



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ciencia e Ingeniería de Sistemas

y Automática

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRÓNICA

INDUSTRIAL

**ADAPTACIÓN Y CONTROL DE PLATAFORMAS HARDWARE DOCENTES
MEDIANTE TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor: Alberto Rodríguez Nava

Tutor: Ramón Ignacio Barber Castaño

LEGANÉS, OCTUBRE 2011

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a Ramón, mi tutor de proyecto, por la atención y apoyo que has tenido conmigo y por la ayuda que me has prestado en todo momento. Desde tu punto de vista gracias a tu experiencia, sin tus consejos este proyecto no habría sido posible.

Gracias principalmente a mis padres y a mi hermano, ya que, día a día habéis sido un soporte en el cual apoyarme, con vuestros consejos, vuestras opiniones y sobre todo vuestra confianza depositada en mí. Ahora me seguís apoyando día a día en el inicio de mi carrera profesional y por eso se que desde el principio hasta el final no me habéis fallado nunca y sé que nunca lo haréis. Gracias de todo corazón.

Quiero dar las gracias a mi novia que aunque sólo has estado en la recta final de la carrera, tu apoyo y tu paciencia al aguantarme han sido de vital importancia para reunir fuerzas en la finalización de esta. Gracias por estar siempre ahí.

Me gustaría agradecer a mis compañeros, muchos, y sobre todo, a mis amigos de universidad, que a medida que iba avanzando en la carrera erais más y cada vez era más fácil todo, ya que siempre había alguien dispuesto a ayudarme. Gracias a los que estuvieron desde el principio, a los que estuvieron al final y a los que estuvieron, se fueron y luego volvieron. Son muchas horas de estudio juntos y porque no decirlo, de cañas, comidas, cenas, diversión y viajes. Gracias por todo.

Mención especial se merecen mis amigos. Algunos de la universidad y otros de antes, todos habéis aportado vuestro granito de arena para que yo pueda terminar esto que empecé hace tiempo. Sabéis lo que sois para mí. Gracias por ser así.

Sé que en el futuro me encontraré con mucha más gente en otras etapas de mi vida, pero me siento orgulloso de haber compartido momentos con todos y cada uno de vosotros.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
CONTENIDO	5
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Motivación	11
1.2 Objetivos	11
1.3 Partes del documento	13
2. MAQUETAS DE LABORATORIO	15
2.1 Maqueta de un motor de corriente continua.	17
2.1.1 Encoders (codificadores angulares de posición)	17
2.2 Maqueta del secador.	21
3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	23
3.1 Buses PCI	25
3.2 Hardware de la adquisición de datos.	26
3.3 Tarjeta advantech 1711s.	30
4. REGULADORES PID	35
4.1 Conceptos de regulación	37
4.2 Objetivos de control	42
4.3 Acciones básicas de control (p,i,d)	45
4.3.1 Acción proporcional	45
4.3.2 Acción integral	45
4.3.3 Acción derivativa	46
4.4 Reguladores.	46
4.4.1 Regulador P.	46
4.4.2 Regulador PI	47
4.4.3 Regulador PD	48
4.4.4 Reguladores PID.	48
4.4.5 Otras configuraciones.	49
4.5 Reguladores industriales digitales.	51
4.5.1 Ventajas del regulador digital.	52
4.5.2 Tipos de reguladores industriales digitales.	52
4.5.3 Campo de aplicación.	53
4.5.4 Regulador industrial sipart DR20	54
5. AJUSTE DE REGULADORES POR ZIEGLER-NICHOLS.	59
5.1 Ziegler –Nichols: estimación en bucle abierto.	62
5.2 Ziegler-nichols: estimación en bucle cerrado o estabilidad límite	63

6.	CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	67
6.1	Descripción de la maqueta	69
6.1.1	Tarjeta de adquisición de datos.	73
6.1.2	PC.	73
6.2	Esquema de control	74
6.2.1	Referencia.	75
6.2.2	Acción proporcional.	75
6.2.3	Acción integral.	76
6.2.4	Acción derivativa.	76
6.2.5	ReguladorPID.	77
6.2.6	Entrada y salida de la tarjeta de adquisición.	77
6.2.7	Osciloscopio.	78
6.3	Ajuste del regulador	79
6.3.1	Ganancia $K=50$	80
6.3.2	Ganancia $K=100$	81
6.3.3	Ganancia $K=200$	82
6.3.4	Ganancia K óptima.	82
7.	CONTROL DE TEMPERATURA DE UN SECADOR.	85
7.1	Introducción a los sistemas de temperatura.	87
7.2	Descripción de la maqueta.	88
7.3	Esquema de control	93
7.3.1	$K_p=10$, $K_i=1$, $K_d=1$	94
7.3.2	$K_p=100$, $K_i=10$, $K_d=10$	95
7.3.3	Regulación óptima. $K_p = 100$, $K_i=1$, $K_d = 1$	95
7.4	Ajuste del regulador	96
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	99
8.1	Conclusiones	100
8.2	Trabajos futuros	100
	BIBLIOGRAFÍA	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conversión de la señal alterna a continua.	17
Figura 2. Encoder absoluto.....	18
Figura 3. Potenciómetro lineal (Guemisa S.L.)	18
Figura 4. Encoder óptico (USDigital Corporation)	19
Figura 5. Partes y configuración de un Encoder incremental.....	19
Figura 6. Representación de las señales incrementales A,B y Z en disco óptico.....	20
Figura 7. buses pci.	25
Figura 8. Esquema básico de conexiones entre elementos.	27
Figura 9. Sensor de temperatura termopar.....	28
Figura 10. BLOQUES DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS.	29
Figura 11. Tarjeta de adquisición de datos ADVANTECH 1711S.	30
Figura 12. Conexión de salida de la tarjeta ADvantech 1711s.	31
Figura 13. Bornero de conexiones de la tarjeta.....	32
Figura 14. Conexiones del bornero PCLD-8710 "Terminal wiring board".....	32
Figura 15. Prueba 1 de comprobación de comunicación.....	33
Figura 16. Prueba 2 de comprobación de comunicación.....	34
Figura 17. Válvula de mariposa con actuador electroneumático.....	37
Figura 18. Medidor de caudal con 2 sensores ultrasónicos.....	40
Figura 19. REgulador PID.....	41
Figura 20. Sistema de regulación.	42
Figura 21. Mejoras en el comportamiento de sistemas.	43
Figura 22. Compensador, controlador o regulador.	45
Figura 23. Regulador proporcional.....	47
Figura 24. Regulador proporcional-integral.....	47
Figura 25. Regulador proporcional-derivativo.	48
Figura 26. Regulador proporcional-integral-derivativo.	49
Figura 27. Sistema de control PID modificado.	50
Figura 28. Saturación de los actuadores.	50
Figura 29. Circuito de regulación, esquema funcional.	51
Figura 30. Vista frontal del SIPART DR20.	55
Figura 31. Regulador SIPART DR20, esquema funcional.	56
Figura 32. Conversor tensión-intensidad.....	57
Figura 33. Convertidor tensión-intensidad.....	57
Figura 34. Respuesta ante escalón.....	63
Figura 35. Sistema de cadena cerrada.	64
Figura 36. Oscilación mantenida de un bucle cerrado.....	64
Figura 37. Esquema de ajuste por el método de Zielger-Nichols.	65
Figura 38. Motor de corriente continua utilizado.	69
Figura 39. Cableado electrónico de funcionamiento del motor.	69
Figura 40. Esquema de conexionado de los elementos que componen la maqueta.....	70
Figura 41. Bornes de control, entradas y salidas del motor.	71
Figura 42. Rango de funcionamiento del motor.....	72
Figura 43. Cable de conexión entre tarjeta de adquisición de datos y bornero de conexiones.....	74
Figura 44. Esquema de control mediante un regulador PID.....	75
Figura 45. Pantalla del osciloscopio: referencia y salida del sistema regulador.	78
Figura 46. Gráfica del ajuste por el método de cadena abierta.....	80
Figura 47. Cadena cerrada con $K = 50$	81
Figura 48. Cadena cerrada con $K = 100$	81
Figura 49. Cadena cerrada y $K = 200$	82

Figura 50. Cadena cerrada y $K = 125$	83
Figura 51. Zoom de $K = 125$. K óptima.	83
Figura 52. Gráfica del sistema ajustado por ziegler-nichols.....	84
Figura 53. Intercambiador de calor de placas utilizado en plantas termosolares.....	88
Figura 54. maqueta del secador.....	89
Figura 55. VISTA FRONTAL DEL CONVERTIDOR TENSIÓN INTENSIDAD.....	90
Figura 56. VISTA LATERAL DEL CONVERTIDOR TENSION INTENSIDAD.....	91
Figura 57. ESQUEMA DE CONEXIONADO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN LA MAQUETA.....	92
Figura 58. Esquema de control del regulador pid para el control de un secador.....	94
Figura 59. gráfica del regulador $k_p=10$, $k_p=1$, $k_d=$	94
Figura 60. gráfica del regulador $k_p=100$, $k_i=10$, $k_d=10$	95
Figura 61. Control de temperatura de un secador mediante un regulador PID.....	95

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de parámetros de reguladores para la estimación en bucle abierto.....	63
Tabla 2. Tabla de parámetros de reguladores para la estimación en bucle cerrado.	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En el mundo de la docencia cada día es más necesaria la puesta en práctica de los conocimientos teóricos, para acercar al alumno al mundo de la realidad. A su vez, por las exigencias actuales y coste de los equipos, aparece cada día más la necesidad de que esas prácticas se hagan de manera remota. Las nuevas tecnologías informáticas y sistemas de adquisición de datos facilitan el desarrollo de este tipo de prácticas.

Dentro de esta tendencia, en este trabajo se realiza varios trabajos, entre los que se integra este proyecto, destinado a la puesta en marcha de hardware de laboratorio y de su control mediante herramientas que permitan una mejor integración en prácticas remotas.

El proyecto ha requerido de trabajo hardware para adaptar la actual maqueta del secador, disponible en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid. La maqueta estaba adapta inicialmente para su control con reguladores SIPART DR20 y ha sido necesario estudiar y realizar una interface hardware con la tarjeta PCLAB 1711 que permitiera su control su control con Simulink, Para ello fue necesario realizar el estudio de conexión entre el SIPART y la maqueta, pues no se disponía información previa ninguna.

Posteriormente se realiza, un ajuste de reguladores PID, por técnicas de ensayo y error y de Ziegler-Nichols tanto para la maqueta del motor como para la del secador.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es la puesta en marcha de dos maquetas de laboratorio con destino a realizar prácticas remotas. Este objetivo se concreta en:

Adaptación de las interfases hardware de las maquetas que permitan hacer el control en un PC.

Realizar unos esquemas de control con herramientas software que permitan la integración en sistemas reales.

Los trabajos se han llevado a cabo sobre 2 maquetas:

Motor de corriente continua sobre el que se predice un control por posición.

Sistema térmico constituido por un secador de pelo

El objetivo común de las 2 partes es conseguir tener un control ajustable para cada uno de los casos propuestos anteriores. Para ello será necesario lo siguiente:

Montaje y conexonado de las diferentes maquetas.

Comprobación del cableado y del buen funcionamiento de todos los componentes.

Análisis de entradas y salidas de todos los componentes incluidos en el circuito.

Realizar un ajuste completo mediante un regulador PID ante entrada escalón.

Ajuste del regulador PID por el método empírico de Ziegler-Nichols.

Recogida de datos y exposición de los resultados.

Estos objetivos son aplicables a cada parte de las anteriormente descritas variando, como es lógico, en cada una de ellas.

1.3 Partes del documento

En el capítulo primero se describe las principales motivaciones y objetivos que han dado lugar a este proyecto.

En el capítulo segundo se describen las maquetas de prácticas empleadas en este proyecto y que han sido conectadas a través de la tarjeta de adquisición de datos descrita en el capítulo 3.

En los capítulos cuarto y quinto se describen los conceptos básicos de control que serán empleados a lo largo de este proyecto y el método de ajuste de reguladores por Ziegler Nichols, empleado para realizar los ajustes del regulador.

En los capítulos sexto y séptimo se describe las implementaciones y ajustes realizados sobre las maquetas de prácticas, así como sus resultados experimentales. Por último, en el capítulo 8, se muestran las conclusiones y posibles vías de continuación de este proyecto.

2. MAQUETAS DE LABORATORIO

Este proyecto está fundamentalmente compuesto por 2 maquetas anteriormente mencionadas:

2.1 Maqueta de un motor de corriente continua.

Esta maqueta consta de un motor de corriente continua, además de un circuito electrónico de alimentación de entrada en el que se incluye un rectificador de onda, un filtro y un convertidor CA-CC.

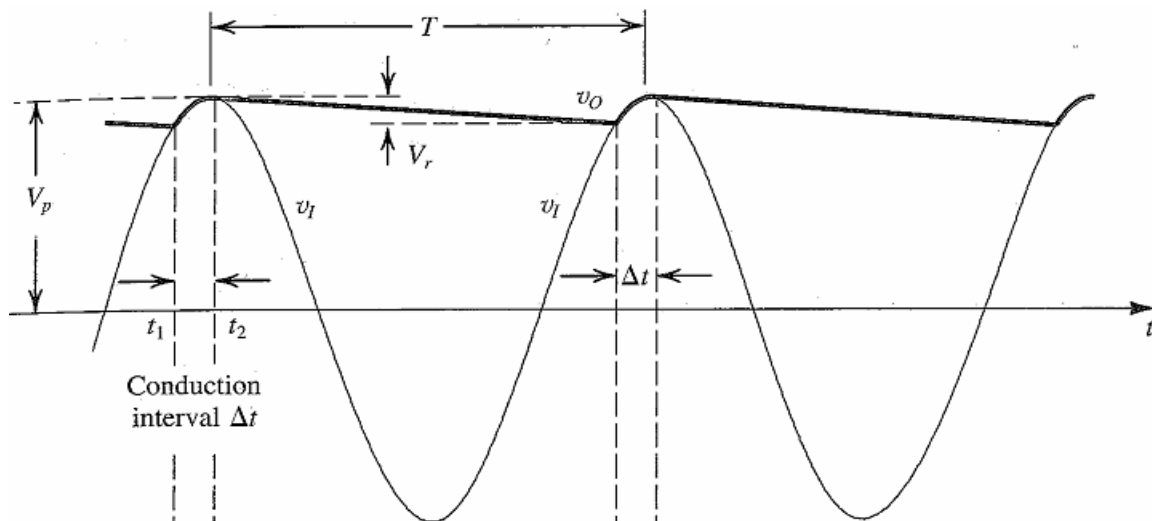


Figura 1. Conversión de la señal alterna a continua.

También contiene un circuito digital de salida compuesto por un encoder con el que se mide constantemente la posición del motor.

2.1.1 Encoders (codificadores angulares de posición)

Constan de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación y de un elemento fotorreceptor.

El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco, a medida que el eje gira se van generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese las marcas, llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje.

La resolución depende del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco.

El funcionamiento de un encoder absoluto es similar, pero el disco se divide en un número de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos con un código binario (código Gray), con zonas transparentes y opacas.

La resolución es fija y viene dada por el número de anillos que posea el disco granulado $\Rightarrow 2^8$ hasta 2^{19}

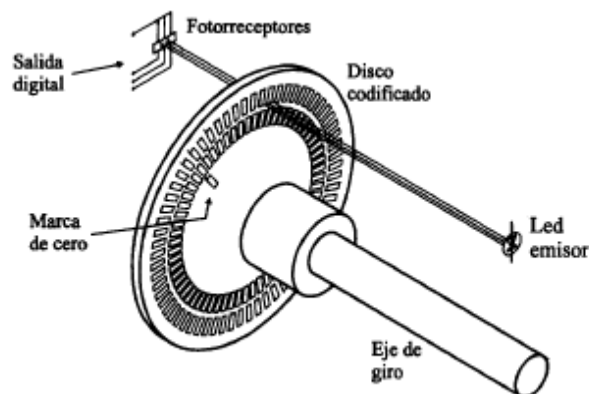


Figura 2. Encoder absoluto



Figura 3. Potenciómetro lineal (Guemisa S.L.)



Figura 4. Encoder óptico (USDigital Corporation)

Un encoder es un codificador rotatorio, también llamado codificador del eje o generador de pulsos, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.

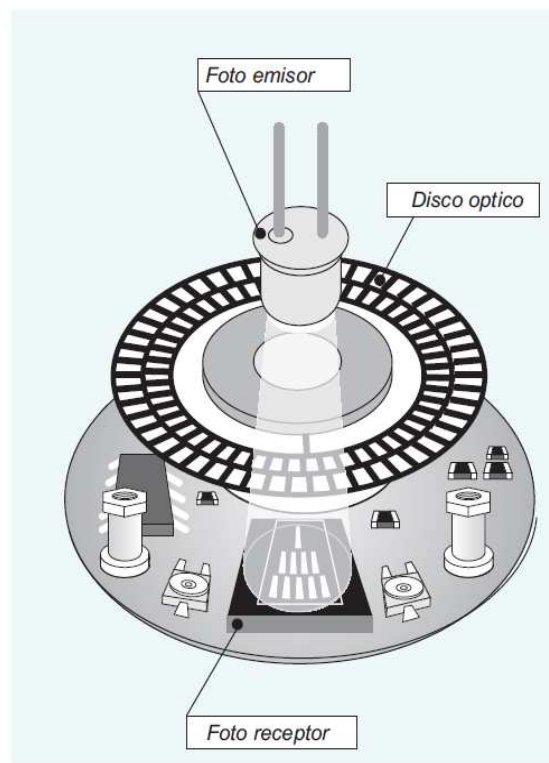


Figura 5. Partes y configuración de un Encoder incremental

Las aplicaciones principales de estos transductores están en las máquinas herramienta o de elaboración de materiales, en los robots, en los sistemas de motores y en los aparatos de medición y control.

El encoder incremental proporciona normalmente dos formas de ondas cuadradas y desfasadas entre sí 90° eléctricos, los cuales por lo general son canal A y canal B. Con la lectura de un solo canal se dispone de la información correspondiente a la velocidad de rotación, es posible controlar el sentido de rotación. Está disponible además otra señal llamado canal Z o Cero, que proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder. Esta señal se presenta bajo la forma de impulso cuadrado con fase y amplitud centrada en el canal A.

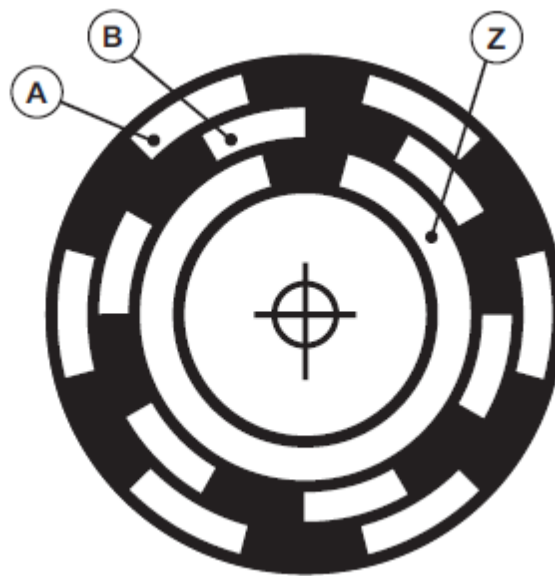


Figura 6. Representación de las señales incrementales A,B y Z en disco óptico.

La señal del encoder es transmitida hasta el borne azul del cuadro de mandos del motor. Más adelante se explica la funcionalidad tanto del cuadro de mandos como de los bornes del mismo (ver capítulo 4, apartado 4.1).

El encoder empleado en la maqueta es incremental. Sus señales pasan por un contador y un conversor A/D y la señal final es leída por la tarjeta de adquisición de datos.

2.2 Maqueta del secador.

Esta maqueta consta de un secador de pelo cotidiano conexasionado a un circuito de medición de temperatura. Este circuito se compone de un sensor que mide la temperatura a la salida del secador. Esta señal se transmite hasta un circuito convertidor que convierte esta señal en una señal digital.

El sensor antes mencionado se trata de un sensor tipo RTD. Los detectores de temperatura resistivos (RTD – Resistance Temperature Detector) son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura.

Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia.

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica como sigue a continuación. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

donde:

- R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia T_0
- ΔT es la desviación de temperatura respecto a T_0 ($\Delta T = T - T_0$)
- α es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura

Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino.

Llegado a una determinada temperatura el sensor deja de medir, dando el máximo valor posible y dejándolo estable en el máximo.

Es necesario comentar que tanto las salidas y las entradas de la maqueta del secador son en corriente, siendo el rango variable de medición entre 4 -20 miliamperios. 4 miliamperios coincide con el valor más bajo que puede medir el sensor y 20 coincidirá con el valor más elevado del mismo.

Para poder leer la señal utilizando la tarjeta de adquisición de datos, que trabaja en tensión, ha sido necesario acoplar un convertidor de corriente que nos permitiera unir ambos equipos.

3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En este capítulo vamos a tratar de describir el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos.

Una tarjeta de adquisición de datos es un elemento que interconexiona por un lado los actuadores y sensores de los elementos a controlar y por el otro el PC o el elemento de control.

3.1 Buses PCI .

La tarjeta de adquisición de datos utilizada en este proyecto es una tarjeta de conexión PCI al ordenador. Una tarjeta PCI (“Peripheral Component Interconnect” o Interconexión de Componentes Periféricos) [1] consiste en un bus de ordenador estándar para conectar dispositivos periféricos directamente a su placa base.

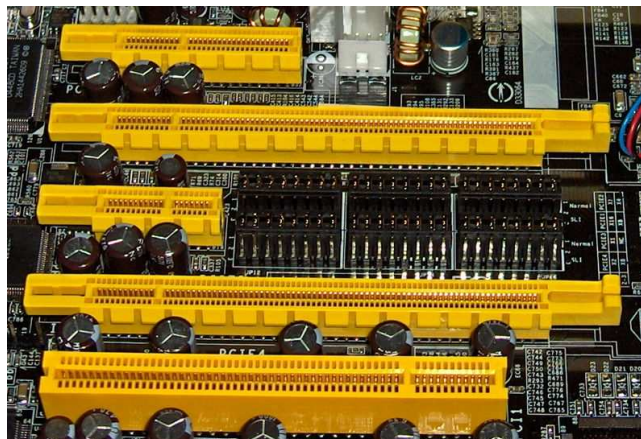


FIGURA 7. BUSES PCI.

Estos dispositivos pueden ser circuitos integrados ajustados en ésta (los llamados "dispositivos planares" en la especificación PCI) o tarjetas de expansión que se ajustan en conectores como puede ser esta tarjeta o una más común como las tarjetas gráficas. Es común en PC, donde ha desplazado al ISA como bus estándar a partir de 1990, pero también se emplea en otro tipo de ordenadores.

A diferencia de los buses ISA, el bus PCI permite la configuración dinámica de un dispositivo periférico. En el tiempo de arranque del sistema, las tarjetas PCI y el BIOS interactúan y negocian los recursos solicitados por la tarjeta PCI. Esto permite asignación de direcciones del puerto por medio de un proceso dinámico diferente del bus ISA, donde las

direcciones tienen que ser configuradas manualmente usando jumpers externos. Las últimas revisiones de ISA y el bus MCA de IBM ya incorporaron tecnologías que automatizaban todo el proceso de configuración de las tarjetas, pero el bus PCI demostró una mayor eficacia en tecnología "plug and play". Aparte de esto, el bus PCI proporciona una descripción detallada de todos los dispositivos PCI conectados a través del espacio de configuración PCI.

La especificación PCI cubre el tamaño físico del bus, características eléctricas, cronómetro del bus y sus protocolos.

3.2 Hardware de la adquisición de datos.

Las tarjetas de adquisición de datos son el elemento más importante del sistema y gracias al cual es posible establecer una comunicación en tiempo real entre el sistema a controlar y el controlador o regulador que se pretende diseñar para el correcto control del mismo [2].

Para entender el funcionamiento de la tarjeta de adquisición y conversión de datos es necesaria una explicación del proceso de adquisición y conversión previamente.

La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es, precisamente, el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

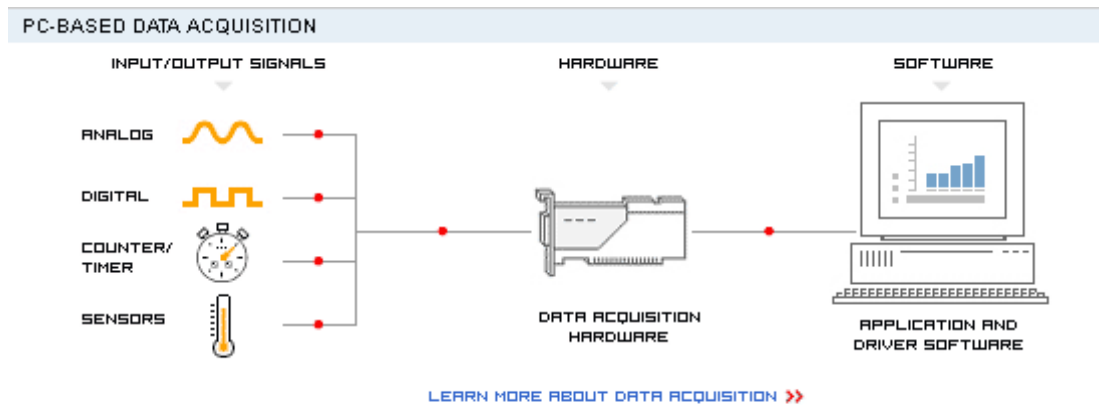


Figura 8. Esquema básico de conexiones entre elementos.

De la misma manera que se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital para enviarla al ordenador, se puede también tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica. En este caso el elemento que hace la transformación es una tarjeta o módulo de Adquisición de Datos de salida, o tarjeta de control. La señal dentro de la memoria del PC la genera un programa adecuado a las aplicaciones que quiere el usuario y, después de procesarla, es recibida por mecanismos que ejecutan movimientos mecánicos, a través de servomecanismos, que también son del tipo transductores.

Un sistema típico de adquisición utiliza sensores, transductores, amplificadores, convertidores analógico - digital (A/D) y digital - analógico (D/A), para procesar información acerca de un sistema físico de forma digitalizada.

La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico o la propiedad física de un objeto (objeto de la investigación) que se desea medir. Esta propiedad física o fenómeno podría ser el cambio de temperatura o la temperatura de una habitación, la intensidad del cambio de una fuente de luz, la presión dentro de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto, o muchas otras cosas. Un eficaz sistema de adquisición de datos puede medir todas estas diferentes propiedades o fenómenos.

Un sensor es un dispositivo que convierte esa propiedad física o fenómeno en una señal eléctrica correspondiente medible, tal como tensión, corriente, el cambio en los valores de resistencia o condensador, etc.

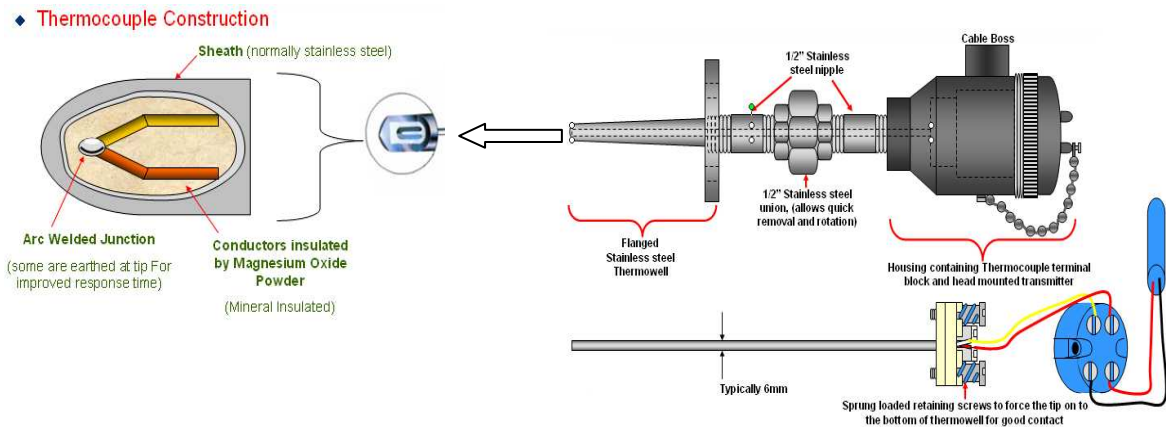


Figura 9. Sensor de temperatura termopar.

La capacidad de un sistema de adquisición de datos para medir los distintos fenómenos depende de los transductores para convertir las señales de los fenómenos físicos medibles en la adquisición de datos por hardware.

Los transductores son sinónimo de sensores en sistemas de DAQ. Hay transductores específicos para diferentes aplicaciones, como la medición de la temperatura, la presión, o flujo de fluidos. DAQ también despliega diversas técnicas de acondicionamiento de señales para modificar adecuadamente diferentes señales eléctricas en tensión, que luego pueden ser digitalizadas. Las señales pueden ser digitales o analógicas en función del transductor utilizado.

El acondicionamiento de señales suele ser necesario si la señal desde el transductor no es adecuado para la DAQ hardware que se utiliza. La señal puede ser amplificada, desamplificada, o puede requerir un filtrado en el amplificador para realizar demodulación. Varios otros ejemplos de acondicionamiento de señales podrían ser el aislamiento para proteger al transductor, el multiplexado para medir varias señales en diferentes canales, la excitación del sensor como en las galgas extensiométricas, la linealización de las respuestas de sensores no lineales, etc.

A veces el sistema de adquisición es parte de un sistema de control, y por tanto la información recibida se procesa para obtener una serie de señales de control.

En la figura 10 podemos observar los bloques que componen nuestro sistema de adquisición de datos.

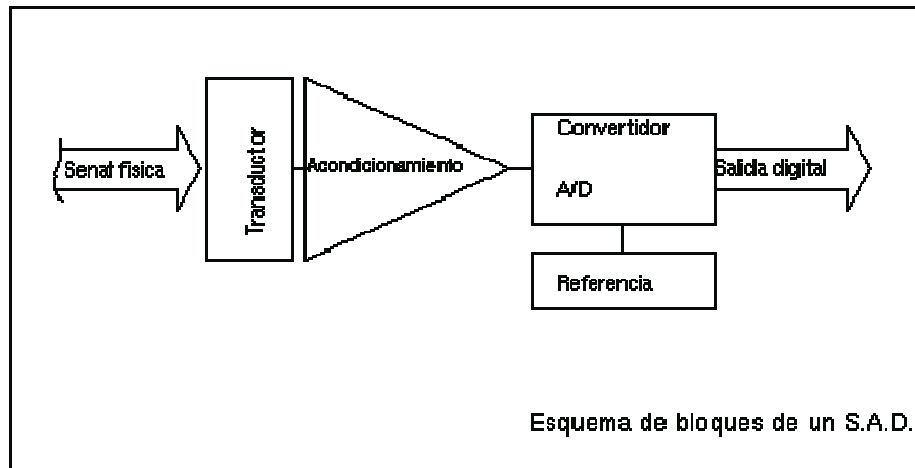


FIGURA 10. BLOQUES DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

Como vemos, los bloques principales son estos:

- Transductor
- El acondicionamiento de señal
- El convertidor analógico-digital
- La etapa de salida (interfaz con la lógica)

El transductor convierte la magnitud física que vamos a medir en una señal de salida (normalmente tensión o corriente) que puede ser procesada por nuestro sistema. Salvo que la señal de entrada sea eléctrica, podemos decir que el transductor es un elemento que convierte energía de un tipo en otro. Por tanto, el transductor debe tomar poca energía del sistema bajo observación, para no alterar la medida.

El acondicionamiento de señal es la etapa encargada de filtrar y adaptar la señal proveniente del transductor a la entrada del convertidor analógico / digital. Esta adaptación suele ser doble y se encarga de:

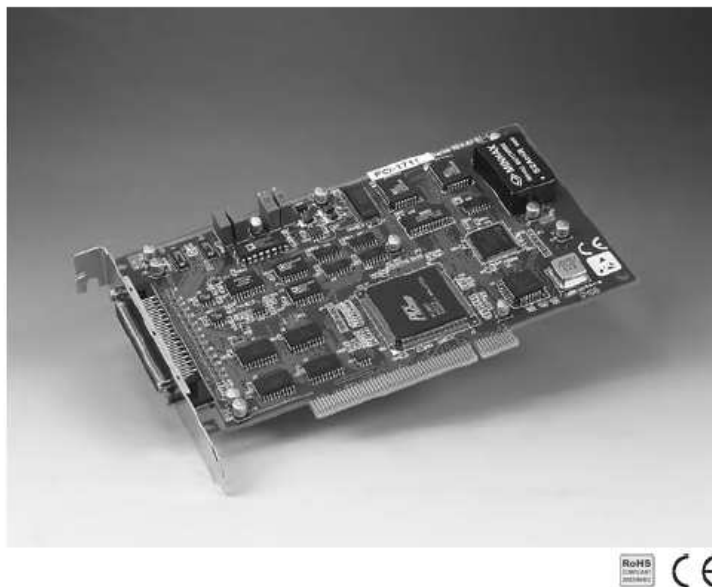
- Adaptar el rango de salida del transductor al rango de entrada del convertidor.(Normalmente en tensión).
- Acoplar la impedancia de salida de uno con la impedancia de entrada del otro.

El convertidor analógico/digital es un sistema que presenta en su salida una señal digital a partir de una señal analógica de entrada, (normalmente de tensión) realizando las funciones de cuantificación y codificación.

La etapa de salida es el conjunto de elementos que permiten conectar el sistema de adquisición de datos con el resto del equipo, y puede ser desde una serie de buffers digitales incluidos en el circuito convertidor, hasta una interfaz RS-232, RS-485 o Ethernet para conectar a un ordenador o estación de trabajo, en el caso de sistemas de adquisición de datos comerciales.

3.3 Tarjeta advantech 1711s.

La tarjeta utilizada en este proyecto para los dos casos que nos ocupan se trata de una ADVANTECH 1711S como se puede observar en la figura 5.



Features

- Cost-effective
- 16 single-ended analog inputs
- 12-bit A/D converter, with up to 100 kHz sampling rate
- Programmable gain
- Automatic channel/gain scanning
- Onboard FIFO memory (1024 samples)
- Two 12-bit analog output channels (PCI-1711 only)
- 16 digital inputs and 16 digital outputs
- Onboard programmable counter

Figura 11. Tarjeta de adquisición de datos ADVANTECH 1711S.

Las características de la tarjeta se enumeran a continuación:

- Se trata de una tarjeta PCI.
- Consta de 16 entradas analógicas y 16 entradas digitales.

- Consta de 16 salidas digitales.
- Posee un bornero de conexiones externo unido mediante un cable de datos a la propia tarjeta para el fácil manejo de esta.

En la Figura 12 observamos la conexión de salida de la tarjeta que se conecta directamente mediante un cable de datos y comunicación con el bornero de conexiones.

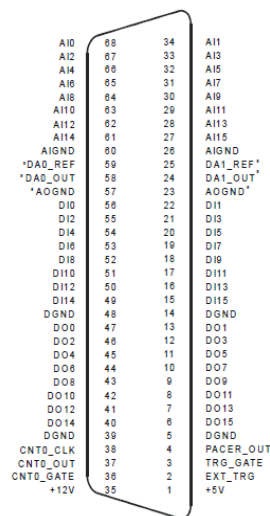


Figura 12. Conexión de salida de la tarjeta ADvantech 1711s.

Esta salida digital de la tarjeta está conectada mediante un cable PCL-10168 a un bornero de conexiones PCLD-8710 como se aprecia en la figura 7.



Figura 13. Bornero de conexiones de la tarjeta.

El bornero de conexiones arriba mencionado consta de 2 filas de entradas/salidas con 40 pines cada una. Según se muestra en la figura tal cada pin de esas filas tiene un nombre asociado y está indicado en la propia tarjeta para mayor comodidad.

La fila de abajo son salidas y entradas analógicas y la fila de arriba son entradas y salidas digitales.

En la figura tal podemos observar las 2 conexiones de las que dispone la tarjeta, por un lado la conexión al cable PCL-10168 y por el otro lado la conexión de las salidas/entradas analógicas/digitales.

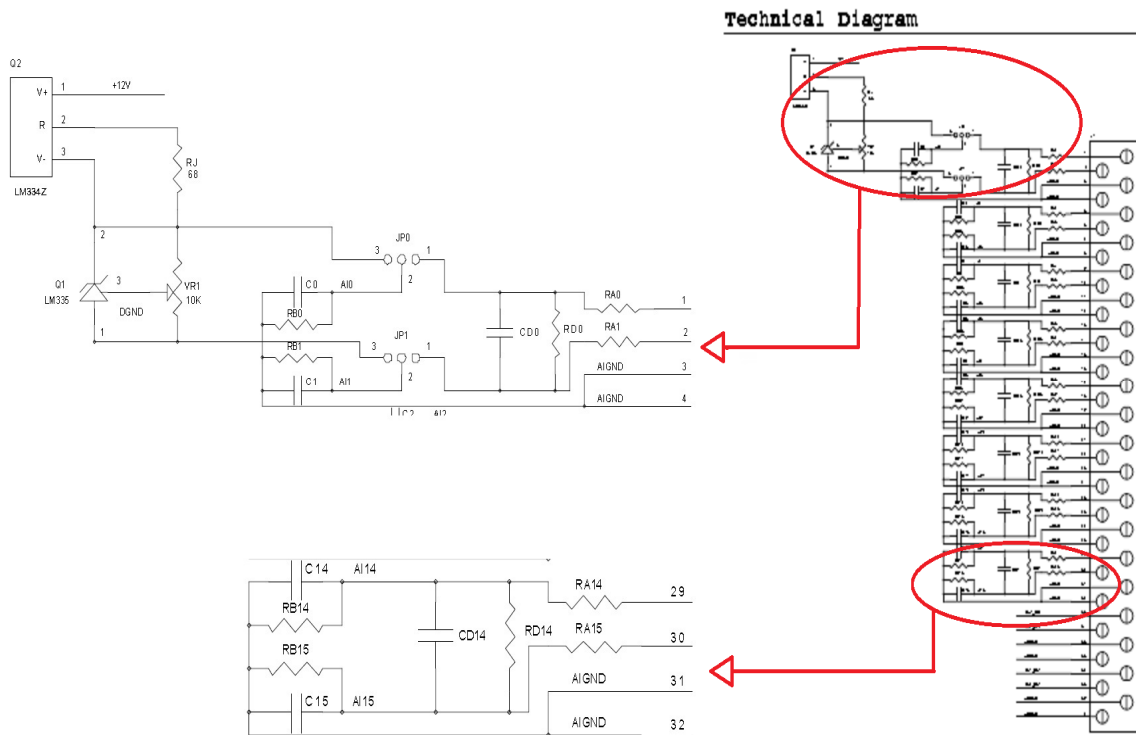


Figura 14 Conexiones del bornero PCLD-8710 "Terminal wiring board"

Antes de empezar a implementar el regulador PID de cada maqueta fueron necesarias unas comprobaciones previas para comprobar que la comunicación entre el PC y la tarjeta era correcta.

En la primera comprobación, como se puede apreciar en la figura 9 fue necesaria la utilización de un osciloscopio, de una fuente de alimentación de continua y de un generador de ondas para comprobar que en la entrada y salida de la tarjeta se obtenía un señal.

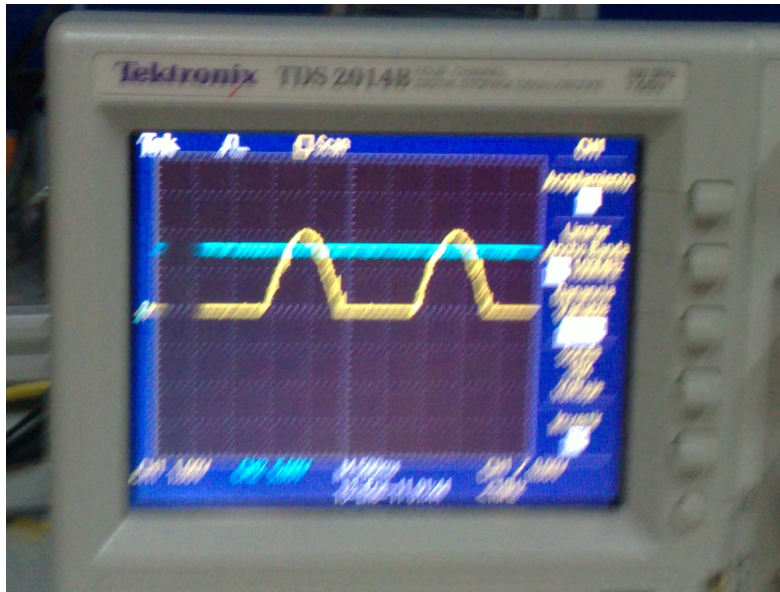


Figura 15. Prueba 1 de comprobación de comunicación.

La señal amarilla es la sonda del generador de señales que se conectó con una entrada de la tarjeta. La salida correspondiente se conectó al osciloscopio para observar la señal a través de la tarjeta. Con la señal azul pasa lo mismo pero con las otras entrada y salida.

Una vez realizada la primera comprobación se pasó a realizar una segunda comprobación, esta vez de la comunicación entre tarjeta y PC. Como se puede apreciar en la siguiente figura 10 se conectaron las 2 entradas con las 2 salidas mediante Simulink.

Con ello obtuvimos las mismas señales tanto en el generador/fuente de alimentación y osciloscopio como en los scope del simulink, signo de que la comunicación era la correcta.

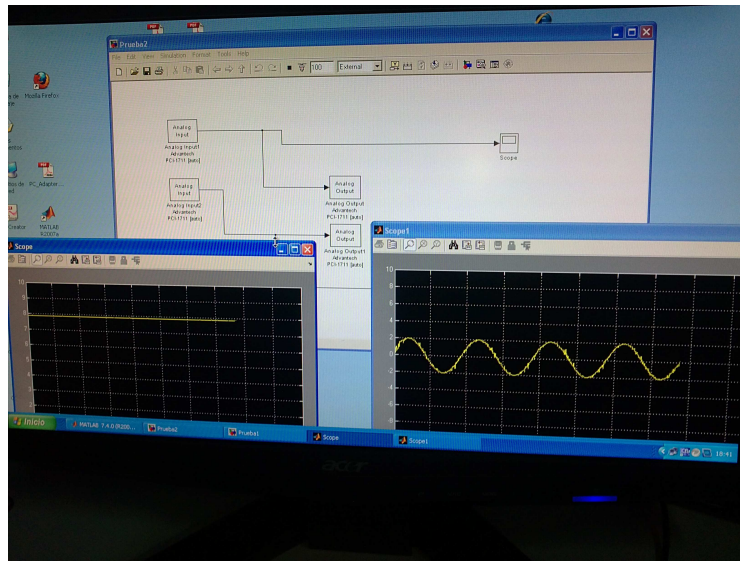


Figura 16. Prueba 2 de comprobación de comunicación.

En las ventanas de la Figura 16 se observa en la de la izquierda la señal de continua de la fuente de alimentación comunicada por el canal 1 de la tarjeta de adquisición, y en la de la derecha la señal del generador de señales comunicada por el canal 2 de la tarjeta.

4. REGULADORES PID

4.1 Conceptos de regulación

En este tema vamos a tratar de explicar de una manera teórica el funcionamiento de los reguladores PID, el ajuste por métodos empíricos, el principio de estos reguladores en la industria y por último las aplicaciones industriales donde nos los podemos encontrar.

Una vez que conocemos el sistema físico a controlar, la variable a controlar y las especificaciones deseadas para que éste siga, en este proyecto vamos a tratar de diseñar un mecanismo de control de manera que la variable controlada cumpla estas especificaciones.

Las especificaciones pueden ser de varios tipos:

- Estáticas, como la precisión.
- Dinámicas, como la amortiguación
- De optimización, como la minimización del error.

El seguimiento de la referencia o “punto de seteo” implica la introducción de dos elementos: el actuador y el generador de referencias. Lógicamente el generador de referencias es el encargado de crear la referencia a seguir y el actuador es el que se encarga en el sistema físico de controlar que el valor del regulador esté en torno al punto de referencia.



FIGURA 17. VÁLVULA DE MARIPOSA CON ACTUADOR ELECTRONEUMÁTICO.

Los tipos básicos de reguladores son los siguientes:

- Control en bucle abierto, utilizado para ajustar por el método de Ziegler-Nichols el regulador.
- Control por realimentación simple, que es en el que nos vamos a basar durante todo el proyecto.
- Control por realimentación múltiple.
- Control por prealimentación.

El objetivo del control automático es poder manejar con una o más entradas (o referencia), una o más salidas de una planta o sistema, para hacerlo, la idea más primitiva es colocar entre la referencia y la planta, un controlador que sea el inverso de la función de transferencia de la planta, de tal manera que la función de transferencia de todo el sistema (la planta más el controlador), sea igual a uno; logrando de esta manera que la salida sea igual a la entrada; esta primera idea se denomina control en lazo abierto. Un ejemplo clásico de control en lazo abierto es una lavadora de ropa ya que ésta funciona durante un ciclo predeterminado sin hacer uso de sensores.

Las desventajas que tiene el control por lazo abierto son:

- Jamás se conoce la planta, como mucho se puede conocer un modelo aproximado, por lo que no se puede lograr el inverso perfecto.
- No se puede usar para controlar plantas inestables.
- No compensa perturbaciones en el sistema.
- Si la planta tiene grado relativo mayor que cero (el grado de la función de transferencia), no se puede crear un controlador que la invierta, ya que no se puede hacer una función de transferencia con grado menor que cero.
- Es imposible invertir perfectamente una planta, si esta tiene retardos, ya que su inverso sería un adelanto en el tiempo (se debería tener la capacidad de predecir el futuro).

Una idea más avanzada, y más ampliamente implementada, es el concepto de “feedback” o realimentación, en que se usa la medición de la salida del sistema, como otra entrada del mismo, de tal forma que se puede diseñar un controlador que ajuste la actuación para variar la salida y llevarla al valor deseado.

Por ejemplo el cuerpo humano realiza un control por realimentación para mantener la temperatura interna, tiene sensores (captadores en el lenguaje de control) para cada elemento en el cuerpo y cuando detecta una cantidad anormal, el cuerpo tiene sistemas para compensarlo (estos sistemas serían el controlador), los que produce una actuación (cierra válvulas, produce más sustancia, etc) hasta que los sensores le indican al cuerpo que ya se alcanzó el equilibrio.

Otro ejemplo sería en un automóvil con control de cruce, el valor de la velocidad se admite y se retroalimenta continuamente al sistema que ajusta la velocidad del motor por medio del suministro de combustible al mismo, en este último caso la salida del sistema sería la velocidad del motor, el controlador sería el sistema que decide cuanto combustible echar de acuerdo a la velocidad y la actuación sería la cantidad de combustible suministrado.

La realimentación también se conoce como regulación en lazo cerrado. Un regulador en lazo cerrado utiliza la realimentación para controlar los estados y las salidas de un sistema dinámico. El nombre de "lazo cerrado" hace referencia al camino que sigue la información en el sistema: las entradas al proceso (por ejemplo, la tensión que se aplica a un motor eléctrico) afecta a las salidas del proceso (por ejemplo, la velocidad o el par que ofrece el motor). Estas salidas se miden con los sensores y se procesan, una vez comparadas con la referencia o consigna, mediante un controlador o regulador; el resultado, una señal de control, se añade a la entrada al proceso, cerrando el lazo. Con lo cual y como hemos dicho antes, el control de lazo cerrado siempre debe estar formado por:

- Un proceso - Medida y transmisión de la variable
- Actuador o controlador - Elemento final de control (ver Figura 17).

Las ventajas que tiene el control por realimentación o en lazo cerrado son:

- Puede controlar y estabilizar sistemas inestables.
- Puede compensar y corregir perturbaciones, tales como el rozamiento impredecible de un motor.
- Puede controlar sistemas incluso si estos tienen errores de modelado.
- Buen comportamiento incluso con incertidumbre en el modelo, es decir, en aquellos casos en que la estructura del modelo no representa perfectamente la realidad del proceso o los parámetros del modelo no se pueden medir con absoluta precisión.

- Tiene tolerancia a variaciones en los parámetros de control.

Las desventajas que tiene son:

- El uso de sensores (encoders, RTD, termopares, medidores de caudal, etc) hace más caro el control.



FIGURA 18. MEDIDOR DE CAUDAL CON 2 SENSORES ULTRASÓNICOS.

- Se introduce el problema del ruido, al hacer la medición, y es necesario incluir un filtro, ya sea electrónico o por software, para la disminución de este fenómeno.
- La única desventaja del control en lazo cerrado, frente al control en lazo abierto, es que el primero reduce la ganancia total del sistema. Esto lleva al uso conjunto del control en lazo abierto y cerrado, para mejorar el rendimiento.

Una arquitectura muy frecuente para un regulador en lazo cerrado es el regulador PID.

En un regulador PID (ver Figura 19), la salida del sistema $y(t)$ se compara con el valor de referencia $r(t)$, a través de las medidas de un sensor. Se alimenta el error e al regulador C . Se define el error e como la diferencia entre el valor de referencia y la salida del sistema. En función del error, el regulador modifica su salida, que es precisamente la alimentación u al proceso que se está controlando, P . Este esquema es el que se muestra en la Figura 19.

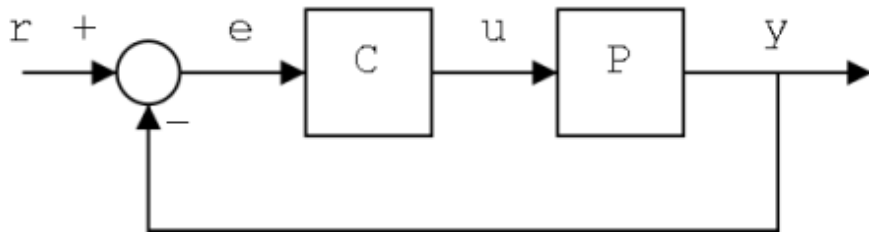


FIGURA 19. REGULADOR PID.

El sistema en la figura es un sistema sencillo de una sola entrada y una sola salida, *SISO* (del inglés *single-input-single-output*); los sistemas más complejos, *MIMO* (*Multi-Input-Multi-Output*) son bastante frecuentes. En estos casos, las variables se representan mediante vectores en lugar de valores escalares.

Entre las metodologías de diseño existentes se encuentran los métodos de síntesis y los métodos de análisis.

Los métodos de análisis consisten en elegir una función de transferencia estándar para $r(t)$, y ajustar sus parámetros en refinamientos sucesivos, mediante el análisis estático y dinámico del sistema, hasta cumplir las especificaciones. Los reguladores más utilizados aparte de los reguladores PID, son las redes de retraso adelanto de fase.

4.2 Objetivos de control

Para un problema de control genérico como el representado en la figura 14 en el que $G(s)$ y $H(s)$ representan la función de transferencia de la planta o proceso a regular. La variable de salida que queremos controlar es $y(t)$, la cual debe cumplir un conjunto de especificaciones.

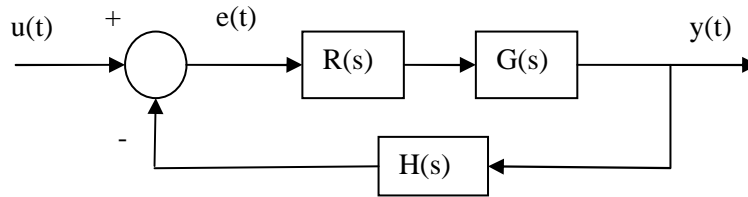


Figura 20. Sistema de regulación.

El objetivo es conseguir que el sistema realice una determinada tarea para lo cual la variable controlada debe seguir las especificaciones. La forma de hacerlo es incorporando un mecanismo de control denominado regulador que está representado por $R(s)$ en la figura 1. Este regulador generará una señal para controlar la planta en función de la señal de error, es decir, en función de la diferencia entre la señal de referencia y la señal realimentada.

Los motivos habituales por los que el sistema necesita compensación son:

- Reducción del error en régimen permanente, sin afectar a la respuesta transitoria que se considera satisfactoria (véase las figuras 15a y 15b)
- Mejora de la respuesta dinámica, sin alterar la precisión estática. Por ejemplo, aumentar la rapidez del sistema sin perder precisión (figura 15c) o disminuir el valor máximo de la respuesta (figura 15d)
- Establecimiento, mediante el ajuste de la ganancia, de un compromiso entre los regímenes transitorio y permanente.
- Estabilización de un sistema que sea inestable con cualquier valor de la ganancia.

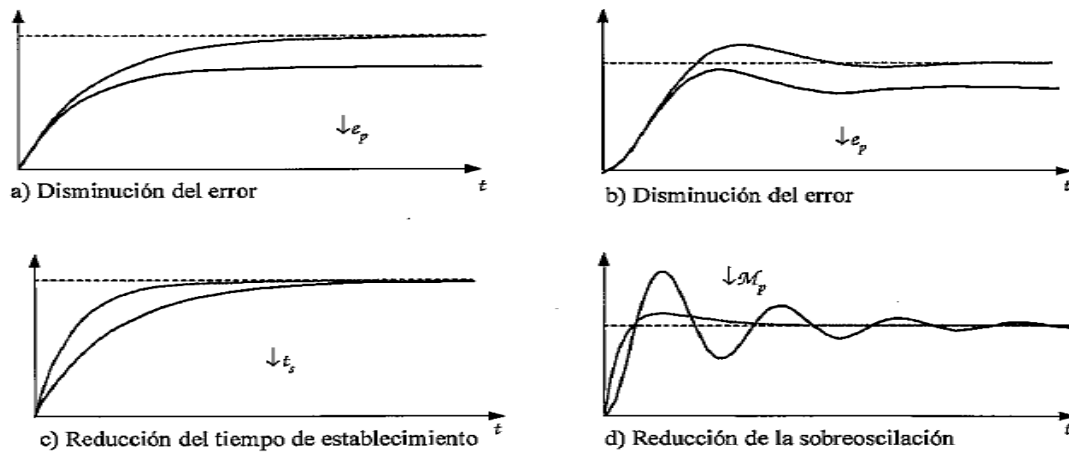


Figura 21. Mejoras en el comportamiento de sistemas.

El objetivo de un sistema de control es que realice una tarea determinada. Para describir como debe llevar a cabo la tarea se proporciona un conjunto de especificaciones. Por ejemplo, el sistema deberá ser estable, la salida no debe superar un valor máximo, el error ante una entrada específica no superará cierto umbral, tendrá una velocidad de respuesta adecuada, etc.

Existen diferentes formas de proporcionar las especificaciones que ha de cumplir un sistema de control. Se pueden dar las especificaciones en el dominio del tiempo (sobreoscilación, tiempo de retardo, error, etc), en el dominio de la frecuencia (margen, de ganancia y de fase, ancho de banda, etc.) y en el dominio complejo (coeficiente de amortiguamiento, factor de crecimiento, frecuencia natural no amortiguada, etc.). Dependiendo de las especificaciones el diseño se realizará por un método u otro.

En el diseño del regulador hay que llegar a un compromiso entre las especificaciones estáticas (estabilidad y errores) y dinámicas (sobreoscilación y diferentes tiempos de respuesta), ya que mejorar el comportamiento dinámico puede empeorar el comportamiento estático y viceversa. Por ejemplo, aumentar la ganancia, mejora el régimen permanente disminuyendo el error, pero el régimen transitorio también se modifica aumentando la sobreoscilación e incluso pudiendo llegar a inestabilizar el sistema.

En general, las condiciones básicas que debe cumplir un sistema de regulación son las siguientes:

1. El sistema ha de ser estable.

2. Ha de tener una determinada precisión en régimen permanente, es decir, la salida debe seguir a la entrada o estar muy próxima a su valor.

3. Ha de estar suficientemente amortiguado, esto es, la respuesta no presentará muchas oscilaciones y el valor máximo de estas oscilaciones debe estar acotado dentro de unos márgenes.

4. Ha de ser suficientemente rápido, debe alcanzar el valor final en un tiempo no muy grande.

Como se ha comentado anteriormente, estas especificaciones pueden llegar a ser contradictorias, el objetivo final es llegar a un compromiso para que todas las condiciones estén dentro de unos márgenes razonables.

4.3 Acciones básicas de control (p,i,d)

En los sistemas de control, la entrada al controlador es la señal de error (diferencia entre el valor deseado de la salida y su valor real). El regulador genera la señal de control que actúa sobre el proceso tendiendo a minimizar el error. Se llama acción de control a la forma en la que el controlador genera la señal de control $u(t)$ a partir de la señal de error $e(t)$.



Figura 22. Compensador, controlador o regulador.

Existen infinitas formas matemáticas de acción de control. Las más utilizadas se conocen como acciones básicas de control: la proporcional, la derivativa y la integral.

4.3.1 Acción proporcional

La señal de control es proporcional a la señal de error:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K$$

La acción es mayor cuanto mayor sea el error.

4.3.2 Acción integral

La señal de control es proporcional a la integral de la señal de error. Si $u(t)$ es la salida del regulador y $e(t)$ la entrada:

$$u(t) = K_i \int_0^{-t} e(t) dt \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Elimina el error ya que sigue actuando hasta que el error se anula. Sin embargo, hace más enérgica la acción de control, por lo que tiende a empeorar la dinámica.

4.3.3 Acción derivativa

La señal de control es proporcional a la variación de la señal de error.

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = K_d \cdot s$$

La acción derivativa actúa según el valor de la pendiente de la curva de error, por lo que detecta anticipadamente cómo va a evolucionar éste, actuando en consecuencia.

4.4 Reguladores.

Para comenzar a explicar el funcionamiento de un regulador PID, primero es necesario explicar el funcionamiento de 3 reguladores más sencillos correspondientes a las acciones de control anteriormente mencionadas.

4.4.1 Regulador P.

La señal de control varía proporcionalmente a la señal de entrada:

$$U(t) = K \cdot e(t)$$

Por lo que la función de transferencia del controlador vale:

$$R(s) = K$$

Siendo K una constante ajustable denominada ganancia del regulador.

El diagrama de bloques correspondiente al regulador proporcional está representado en la figura 23. Con el regulador proporcional existe un error ante entrada escalón a menos que la planta tenga algún integrador.

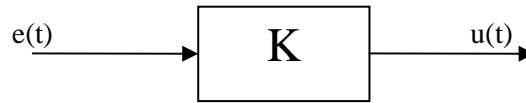


Figura 23. Regulador proporcional.

4.4.2 Regulador PI

La señal de control varía proporcionalmente a la señal de entrada y a la integral de esta:

$$e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^T e(t) dt$$

Aplicando la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia del controlador que será:

$$R(s) = K \left(1 + \frac{1}{t_i s} \right) = K \frac{t_i s + 1}{t_i s}$$

El regulador proporcional-integral aumenta el orden del sistema ya que introduce un polo en el origen y un cero en $-1/t_i$. La acción integral, el polo en el origen, elimina el error en régimen permanente. El diagrama de bloques correspondiente a este regulador está representada en la figura 8. El bloque $R(s)$ de la figura 1 se construye a partir de la suma de los bloques que representan la acción proporcional y la acción integral.

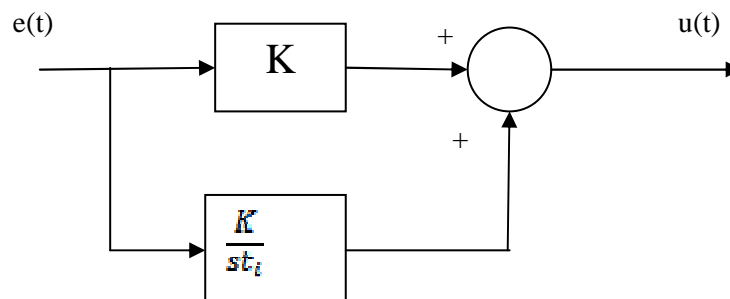


Figura 24. Regulador proporcional-integral.

4.4.3 Regulador PD

La señal de control varía proporcionalmente a la señal de entrada y a la derivada de la señal de entrada:

$$u(t) = K \left(e(t) + t_d \frac{d_e(t)}{dt} \right)$$

Por lo que la función de transferencia del controlador será:

$$R(s) = K(1 + t_d s)$$

Siendo K la ganancia de la acción proporcional y t_d la constante de tiempo de la acción diferencial. Este regulador modifica el sistema al introducir un cero en $-1/t_d$.

Un regulador PD permite mejorar la respuesta del sistema en cuanto a sobreoscilación y tiempo de respuesta sin afecta la acción diferencial al error en régimen permanente. Predice el valor futuro del error con una aproximación lineal. El diagrama de bloques correspondiente a este regulador está representado en la Figura 25

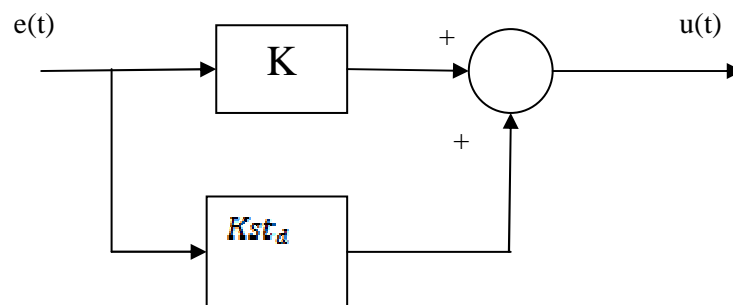


Figura 25. Regulador proporcional-derivativo.

4.4.4 Reguladores PID.

La acción de control es una combinación lineal de las acciones proporcional, integral y diferencial, siendo su acción proporcional al error, a su derivada y a su integral:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^T e(t) dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Por lo que la función de transferencia del controlador será:

$$R(s) = K \left(1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right) = K \frac{t_i s + 1 + t_i t_d s^2}{t_i s}$$

Este regulador incrementa el orden del sistema ya que introduce un polo en el origen y dos ceros. Se utiliza cuando no es posible cumplir las especificaciones de régimen permanente y de régimen transitorio con un regulador PD o un regulador PI. El diagrama de bloques correspondiente a este regulador está representado en la figura 20.

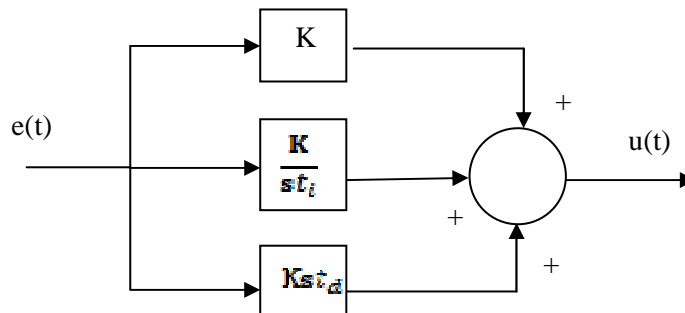


Figura 26. Regulador proporcional-integral-derivativo.

4.4.5 Otras configuraciones.

Los sistemas reales están sometidos a perturbaciones y ruido. En estos casos, los reguladores ideales presentados en secciones anteriores no se comportan de la manera esperada. En sistemas de control es habitual utilizar señales de tipo escalón como entradas de referencia. Estas señales presentan un cambio brusco y la acción derivativa hace que la salida del regulador sea una señal muy grande.

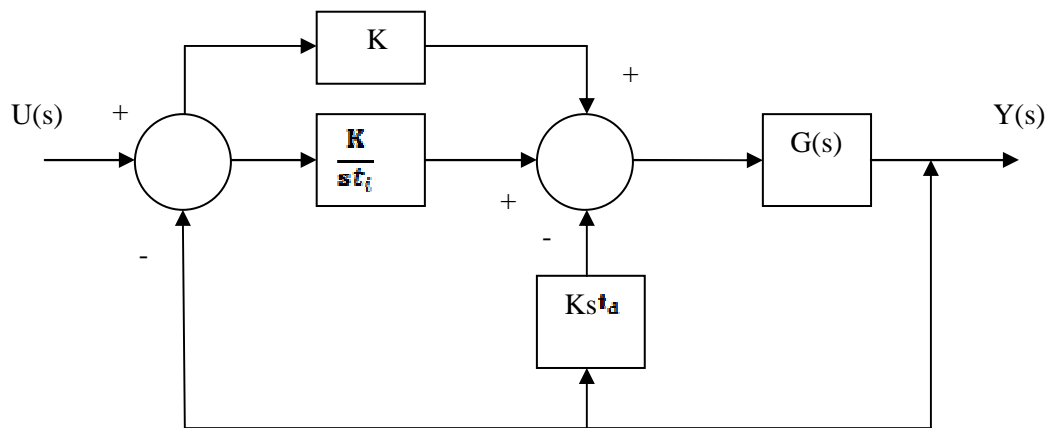


Figura 27. Sistema de control PID modificado.

Para evitar este problema se calcula la acción derivativa únicamente sobre la señal de realimentación del proceso en lugar de sobre la señal de error utilizando un esquema como el de la Figura 27.

El regulador se calcula para que proporcione una señal de control que actúe sobre el sistema para que este responda de la manera deseada. Sin embargo, el regulador PID y los actuadores están constituidos por elementos físicos reales y el valor de la salida que pueden proporcionar está acotado. Si hay acción de control muy enérgica, pero la salida física estará limitada por la capacidad de los actuadores. Este fenómeno se denomina saturación. El esquema correspondiente a esta situación está representado por el bloque central de la figura 4. Como no puede actuar todo lo rápido que se debería, el sistema resulta más lento de lo calculado. Una posible solución a este problema es no derivar la señal de error, sino únicamente la señal realimentada en un esquema como en el de la Figura 28.

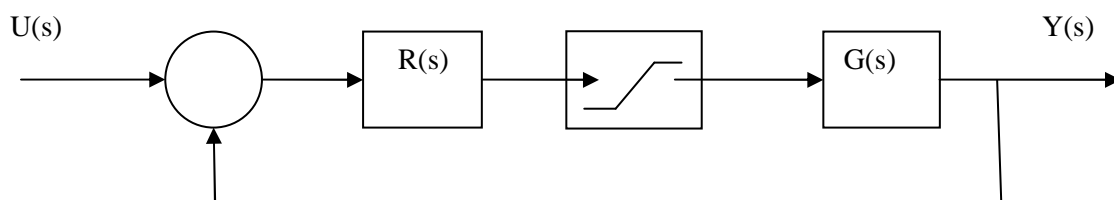


Figura 28. Saturación de los actuadores.

4.5 Reguladores industriales digitales.

Aunque los primeros reguladores digitales fueron realizados con ordenadores de proceso, actualmente se encuentran integrados, no sólo en sistemas más complejos de mando y automatización, sino en la forma de ejecución de un regulador compacto. Como la estructura PID se ha convertido en un estándar en su utilización, se intenta que el regulador digital que trabaja discretamente respecto al tiempo, se acerque bastante en su comportamiento al del regulador analógico.

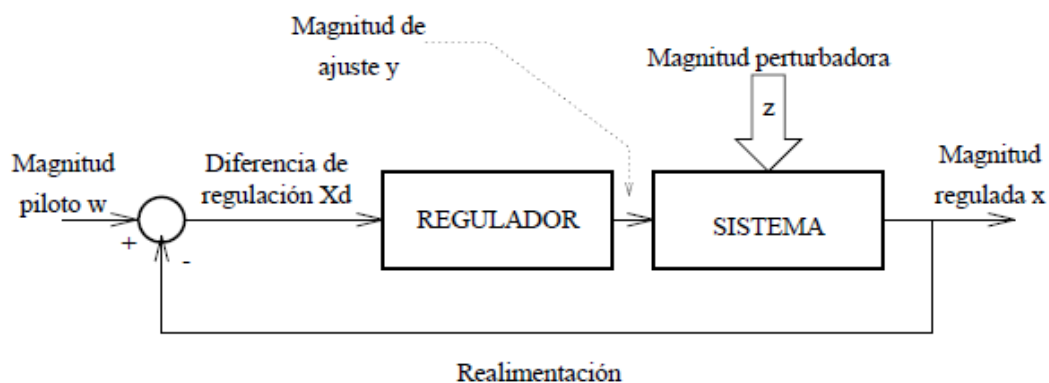


Figura 29. Circuito de regulación, esquema funcional.

- La magnitud regulada es leída y cuantificada en intervalos de tiempo discretos.
- La operación PID es realizada por un algoritmo que está disponible en un procesador, y en cada punto de lectura se calcula una igualdad diferencial. Las partes P, I, D pueden ser ajustadas de forma independiente.
- Por último el valor calculado es conectado al tramo de regulación después de pasar por un convertidor digital-analógico y mantenido hasta la llegada del siguiente valor.

Para exigir el comportamiento casi "*continuo*" del PID digital, habrá que exigir una exploración frecuente y la elección apropiada del tiempo de muestreo.

4.5.1 Ventajas del regulador digital.

En su modo principal de funcionamiento, el regulador se comporta de un modo casi igual al de los controladores analógicos, con unas ventajas adicionales:

- Flexibilidad: Las funciones técnicas de regulación se realizan por software (programas), modificándose sin que el constructor tenga que cambiar el hardware (cableado interno) y pudiendo ser usadas por el usuario en diversas partes del proceso.
- Multiplicidad de funciones. Algunos ejemplos son:
 - ✓ Conmutación automática del servicio manual/automático libre de saltos.
 - ✓ Evitar la saturación del término integral al alcanzar un límite del valor prescrito (referencia).
 - ✓ Limitación ajustable del valor de referencia.
 - ✓ Rampa parametrizable del valor prescrito.
 - ✓ Filtrado de magnitudes del proceso sometidas a perturbaciones.
- Exactitud: Al ser los parámetros ajustados digitalmente libres de desviaciones, y ajustados a voluntad, no presentan problemas en la realización de operaciones matemáticas.

4.5.2 Tipos de reguladores industriales digitales.

Los reguladores industriales pueden ser ajustados dando lugar a distintos tipos de regulaciones según las necesidades del proceso a controlar. Los más importantes son:

- Regulador de acción continua (regulador K) para accionamientos de ajuste neumáticos e hidráulicos. Se denominan continuos porque el dispositivo de accionamiento al que se encuentra conectado el PID puede tomar todas las posiciones intermedias entre "cerrado" y "abierto", actuando así de forma continua a la entrada del aparato de ajuste.

- Regulador de pasos para accionamientos eléctricos. Posee un comportamiento de tres posiciones, (por ejemplo: calentar/enfriar/desconectar) que sólo puede actuar sobre el circuito de regulación junto con un órgano de ajuste motorizado integral. La conexión con el sistema a controlar suele hacerse a través de tarjetas de relés sobre las que actúa el controlador. Se marcha a la posición deseada de acuerdo a una duración de impulso calculada cíclicamente.

- Regulador (regulador S) de dos o tres posiciones. Con este nombre se conocen los reguladores discontinuos, cuya salida puede ser binaria (0/1 - conectar/desconectar) o ternaria (0/1/-1 - calentar/enfriar/desconectar). En el regulador de dos posiciones la magnitud regulada mantiene una oscilación permanente. En el caso de un regulador digital estructurado así, la diferencia de regulación actual es elaborada internamente según el algoritmo PID a un valor de la magnitud de ajuste. A partir de ese valor de cálculo se obtiene la señal de ajuste binaria (0/1) o terciaria (0/1/-1) a dar como relación impulso/pausa con una duración del periodo ajustable.

A diferencia del regulador de pasos, cuyos impulsos de ajuste desaparecen tras decaer la diferencia de regulación, en caso del regulador de dos o tres posiciones también en estado estacionario se dan impulsos de ajuste según el valor estacionario de la magnitud de ajuste calculada.

4.5.3 Campo de aplicación.

La importancia práctica del regulador compacto radica en sus múltiples y atractivas características de potencia. Está caracterizado por reunir todos los componentes del hardware y software necesarios para solucionar los problemas de regulación en los diversos campos de la automatización de procesos, en una caja bastante manejable.

Tanto la estructuración, que es la activación de diversas funciones parciales de acuerdo con el enunciado del problema, como la parametrización, es decir, el ajuste de los datos del aparato dentro del margen de valores, se realizan mediante pulsadores y/o apoyándose en indicaciones de valores digitales o de barras en la parte frontal del aparato.

Los reguladores industriales en general son adecuados para un amplio campo de utilidades desde la técnica de procesos hasta la construcción de máquinas y aparatos.

4.5.4 Regulador industrial sipart DR20

El regulador industrial SIPART DR20 suele estar configurado de forma modular. Se trata de un regulador con diferentes visualizaciones de control del proceso y señalizaciones de estado para múltiples sectores.

4.5.4.1 Estructura.

El regulador Sipart, Figura 30, estudiado para realizar las primeras pruebas de control con la maqueta del secador y la adaptación de las señales de la maqueta a la tarjeta de adquisición de datos, consta de las siguientes partes:

- CPU: unidad de operación e indicación con placa de circuitos impresos principal.
- Placa de circuitos impresos con una fuente de alimentación y elementos de conexión para los circuitos de entrada y salida montados fijos. Esta placa está conectada a la principal a través de una regleta de contactos y enchufada a la parte trasera de la caja.
- Caja de plástico.

El aparato consta de dos entradas analógicas fijas (entradas de corriente fijadas a un potencial que se pueden configurar de 0mA -ó 4mA- a 20mA) y una entrada binaria que actúa de forma normal o invertida (asignándole el cero lógico a la alimentación).



Figura 30. Vista frontal del SIPART DR20.

La salida del regulador (magnitud de ajuste) es diferente según el tipo:

- Regulador K: señal continua de corriente de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA.
- Regulador S: salida conectora con 2 relés para 250V / 5A.

También se dispone de una salida binaria.

El hecho de que el convertidor pueda aceptar otros módulos en su estructura, hace que se pueda ampliar el número de entradas, por ejemplo con conversores de señal enchufados en la parte posterior del aparato. Para la conexión se dispone adicionalmente a las entradas AE1 y AE2 de puestos de enchufes para dos conversores AE3 y AE4 (ver esquema funcional de la Figura 31).

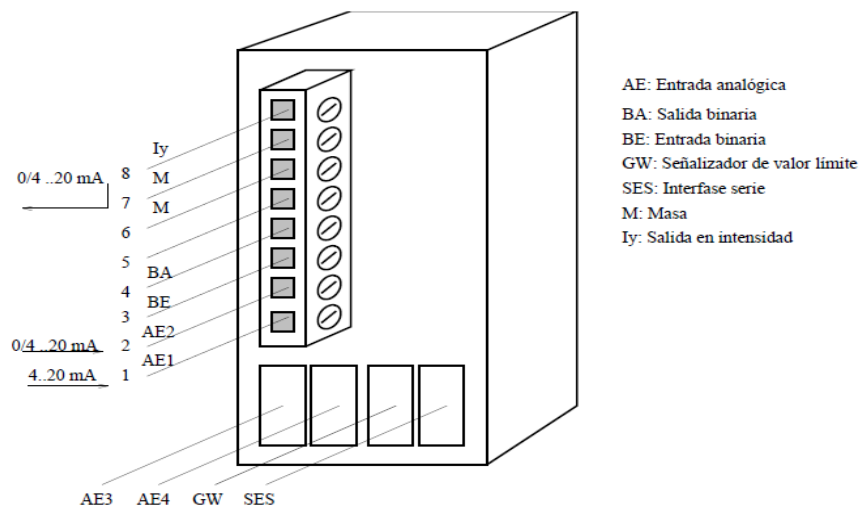


Figura 31. Regulador SIPART DR20, esquema funcional.

El punto de enchufe GW sirve para conectar un convertor de señal para la salida de señalizaciones de valor límite, eligiendo entre dos módulos de señalización distintos. El cuarto enchufe SES está previsto para un módulo interfase para la comunicación serie.

4.5.4.2 Funcionamiento.

El regulador digital SIPART DR20 trabaja sobre la base de un microcontrolador de alta integración. En la memoria de valor fijo del aparato se ha instalado una gran cantidad de funciones preparadas para la regulación de procesos industriales.

El usuario configura el aparato ajustando los interruptores de estructuración. El "programa" es así depositado en la parte no volátil de la memoria de datos por si se produjera un fallo en la tensión de red.

El regulador SIPART DR20 puede ser configurado como P, PI, PD o PID y además el algoritmo de regulación puede ser desconectado por estructuración y entonces el sistema actúa como estación de relación, indicador de proceso o aparato de conducción y mando manual.

- Señales de entrada analógicas:
 - Entrada de corriente 0 a 20 mA ó de 4 a 20 mA en el aparato básico: las entradas analógicas AE1 y AE2 están sujetas a potencial con una carga de 249 Ω . El margen de la señal y la subordinación de las magnitudes de proceso a las

entradas son fijadas mediante los correspondientes conmutadores de estructuración.

- Puesto de enchufe AE3 y AE4 para entrada de corriente 0 a 20 mA ó 4 a 20 mA o entrada en tensión 0 a 10 V. Para la conversión de señales de corriente y tensión o viceversa es necesario introducir un conversor tensión-intensidad o intensidad-tensión según se requiera. Los dos circuitos aparecen esquemáticamente en la Figura 32 y Figura 33.

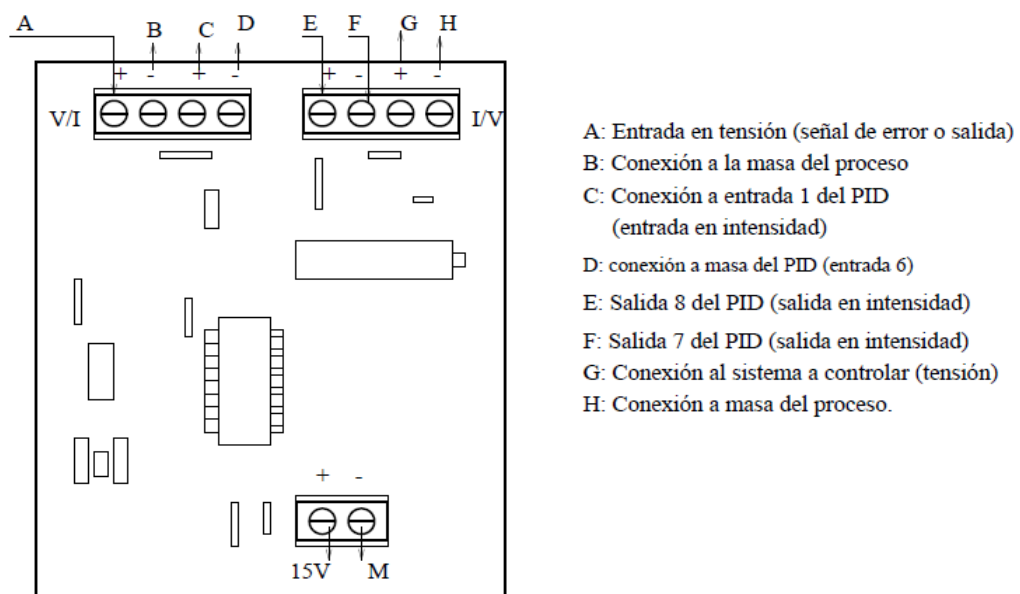


Figura 32. Conversor tensión-intensidad.

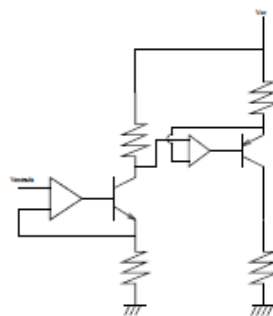


Figura 33. Convertidor tensión-intensidad.

Además, los módulos AE3 y AE4 permiten convertir señales procedentes de termómetros de resistencia Pt100, potenciómetros, etc.

5. AJUSTE DE REGULADORES POR ZIEGLER-NICHOLS.

Existen varias formas de ajustar un PID a partir de la función de transferencia de un sistema. Sin embargo, en muchos procesos industriales el sistema a controlar no es lineal y no es fácil obtener una descripción analítica del mismo. Si no se puede obtener el modelo matemático del sistema, no se puede aplicar un método analítico como el lugar de las raíces para calcular el compensador del sistema. En estos casos se pueden utilizar los métodos empíricos, que nos permiten obtener un conjunto inicial de valores de los parámetros de un PID, realizando solo unas sencillas pruebas sobre el sistema a controlar.

La mayoría de los métodos empíricos se basan en un proceso realizado en tres pasos:

- Medir determinados parámetros relacionados con el comportamiento del sistema, con los cuales se estiman ciertas características de la dinámica del proceso a controlar. Esta operación puede realizarse en bucle abierto o en bucle cerrado, según el método empleado.

A partir de los parámetros anteriores, usando determinadas fórmulas o tablas obtenidas empíricamente, se calculan los parámetros del regulador.

- Ajuste fino mediante la observación de la respuesta en bucle cerrado, ya que estos métodos proporcionan unos parámetros razonables del regulador que constituyen un punto de partida para el ajuste final.

Ziegler-Nichols propusieron dos métodos para calcular los parámetros del regulador de forma experimental:

- Estimación en bucle abierto
- Estimación en bucle cerrado (o estabilidad límite)

Los reguladores de Ziegler-Nichols han sido calculados de forma experimental, buscando una buena solución tanto para el régimen permanente como para el transitorio.

Las fórmulas que permiten obtener los parámetros del regulador PID mediante este método, intentan conseguir que el sistema de lazo cerrado se aproxime al valor de referencia con una sobreoscilación inicial dada y que la siguiente sobreoscilación se reduzca a $\frac{1}{4}$ de la primera. De esta forma consiguen una solución de compromiso entre el transitorio y el permanente.

Para ello, a partir de la respuesta del sistema en las condiciones que se especifique cada método en concreto, se calculan los parámetros K , T_i y T_d de un PID dado por:

$$R(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s$$

5.1 Ziegler –Nichols: estimación en bucle abierto.

El método Ziegler-Nichols o estimación en bucle abierto se basa en medir unos determinados parámetros de la respuesta ante escalón del sistema en cadena abierta (planta). A partir de ellos se calculan los parámetros del regulador.

El procedimiento es el siguiente:

- Someter el sistema en cadena abierta a un escalón.
- Si la respuesta es como la representada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es posible implementar un regulador PID mediante este método.
- En la respuesta obtenida en bucle abierto del sistema mediremos, lo más precisamente posible, los parámetros K , T_0 y T (véase la Tabla 1). La curva en forma de S se caracteriza por dos parámetros, el tiempo de retardo T_0 y la constante de tiempo T . Estos parámetros se calculan dibujando la recta tangente a la curva en el punto de inflexión y determinando su intersección con el eje de tiempos y la recta $y(t) = K$.
- Los parámetros del regulador se calcularán sustituyendo estos valores en las fórmulas empíricas dadas en la Tabla 1:

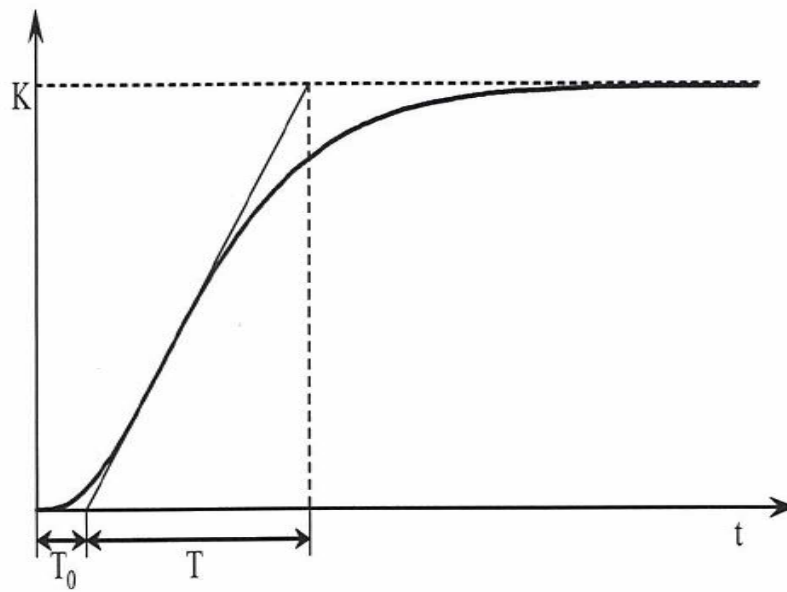


Figura 34. Respuesta ante escalón.

Tabla 1. Tabla de parámetros de reguladores para la estimación en bucle abierto.

	K_p	K_i	K_d
PID	$1.2 \cdot \frac{t}{k \cdot T_0}$	$0.6 \cdot \frac{t}{k \cdot T_0^2} = \frac{0.5 K_p}{T_0}$	$\frac{0.6T}{K} = 0.5K_p \cdot T_0$

5.2 Ziegler-nichols: estimación en bucle cerrado o estabilidad límite

El método Ziegler-Nichols de estimación en bucle cerrado o estabilidad límite se basa en llevar a la estabilidad límite al sistema en cadena cerrada mediante una acción proporcional y medir unos determinados parámetros de la respuesta ante escalón del sistema en cadena cerrada. A partir de ellos se calculan los parámetros del regulador.

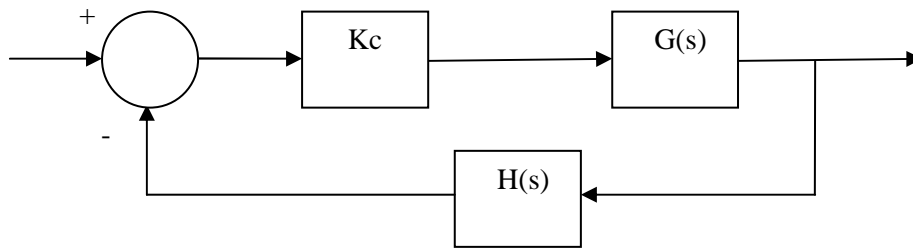


Figura 35. Sistema de cadena cerrada.

El procedimiento es el siguiente:

- Con un regulador proporcional (figura 17) se varia la ganancia hasta el valor crítico en el que la respuesta ante escalón del sistema en bucle cerrado presente una oscilación mantenida (figura 30)

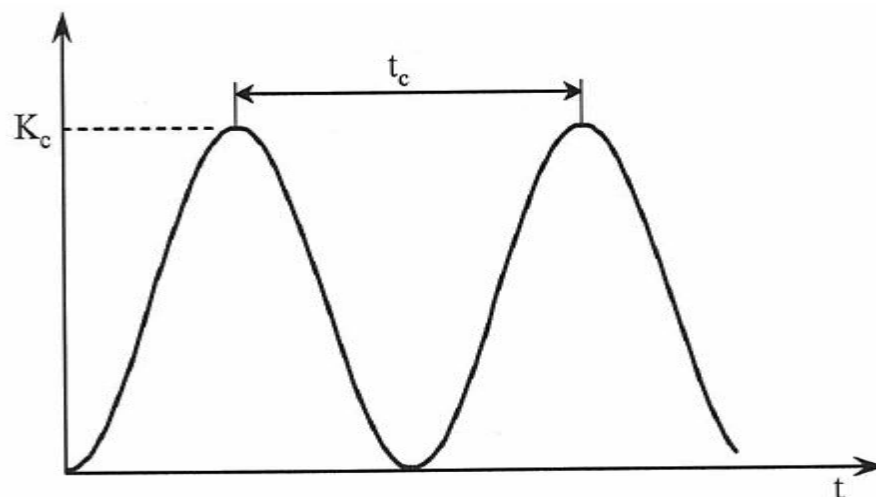


Figura 36. Oscilación mantenida de un bucle cerrado

- Si se consigue que el sistema presente oscilaciones mantenidas, puede ajustarse un regulador mediante este método.
- Se mide la ganancia del regulador proporcional (K_c) y el periodo de las oscilaciones (t_c).
- A continuación se calculan las constantes del regulador según se desee substituyendo estos valores en las fórmulas empíricas dadas en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de parámetros de reguladores para la estimación en bucle cerrado.

	k_p	K_i	K_d
PID	$0.6 \cdot K_c$	$1.2 \cdot \frac{K_c}{t_c} = \frac{2K_p}{T_c}$	$0.075K_c t_c = 0.5 \frac{K_p t_c}{8}$

En la figura 37 se presenta el esquema de los pasos a realizar para la estimación y ajuste del regulador mediante el método de Ziegler-Nichols.

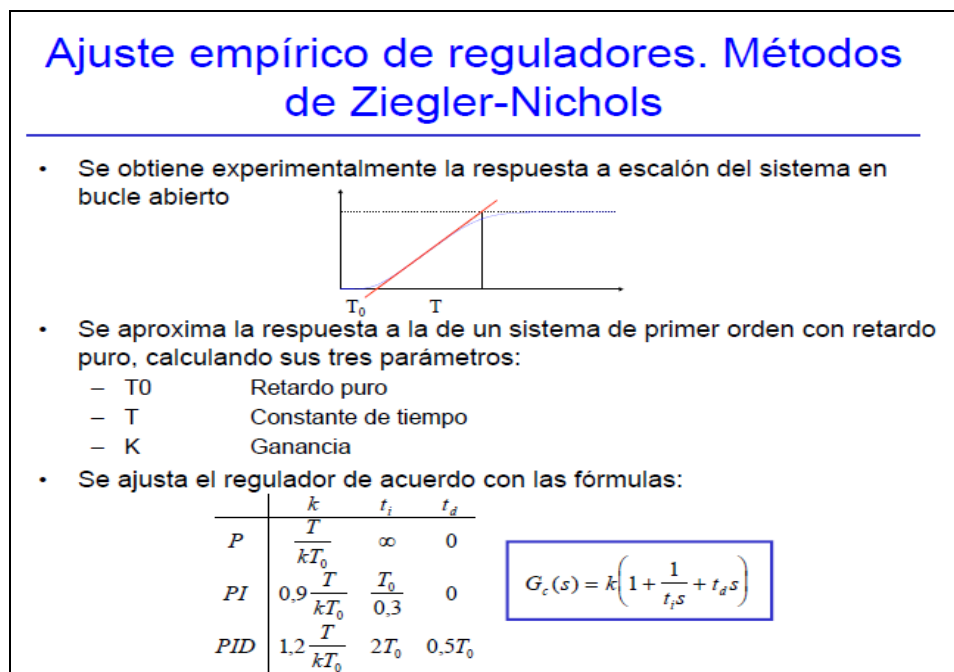


Figura 37. Esquema de ajuste por el método de Zielger-Nichols.

6. CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

6.1 Descripción de la maqueta

En la Figura 38 se muestra un el motor de corriente continua utilizado en la maqueta de prácticas.

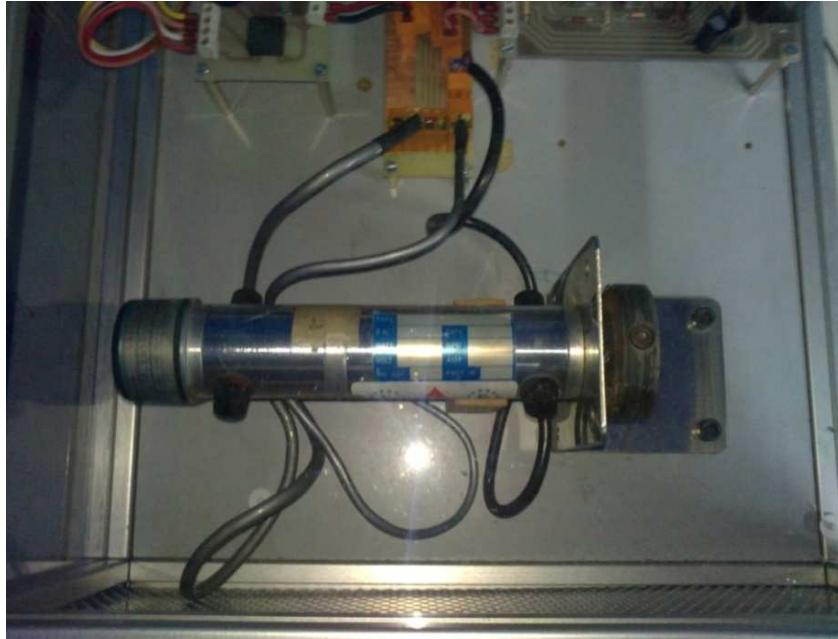


FIGURA 38. MOTOR DE CORRIENTE CONTÍNUA UTILIZADO.

En la Figura 39 se puede observar el cableado electrónico que acompaña al motor en su funcionamiento, el circuito del encoder y el circuito de alimentación.

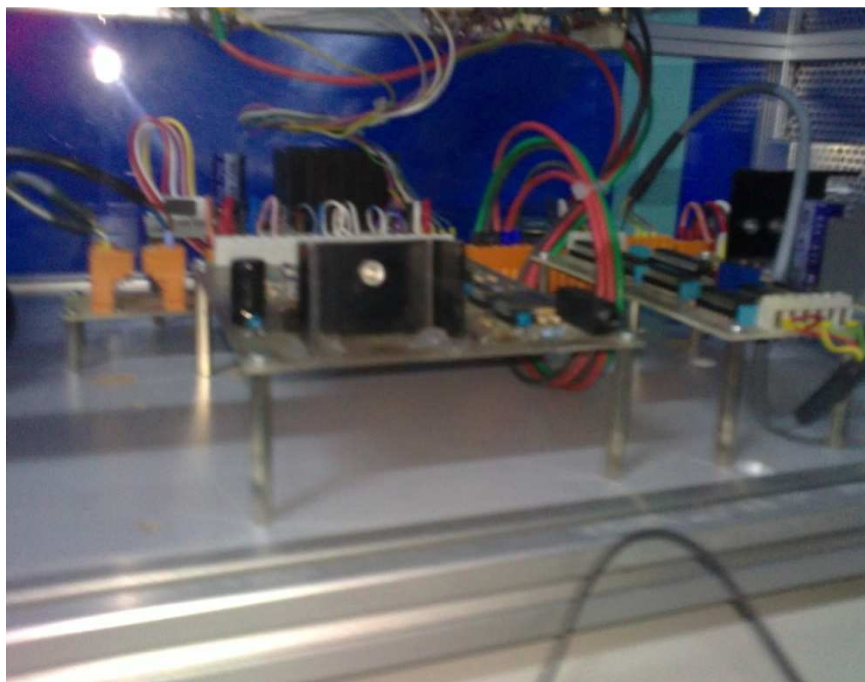


FIGURA 39. CABLEADO ELECTRÓNICO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.

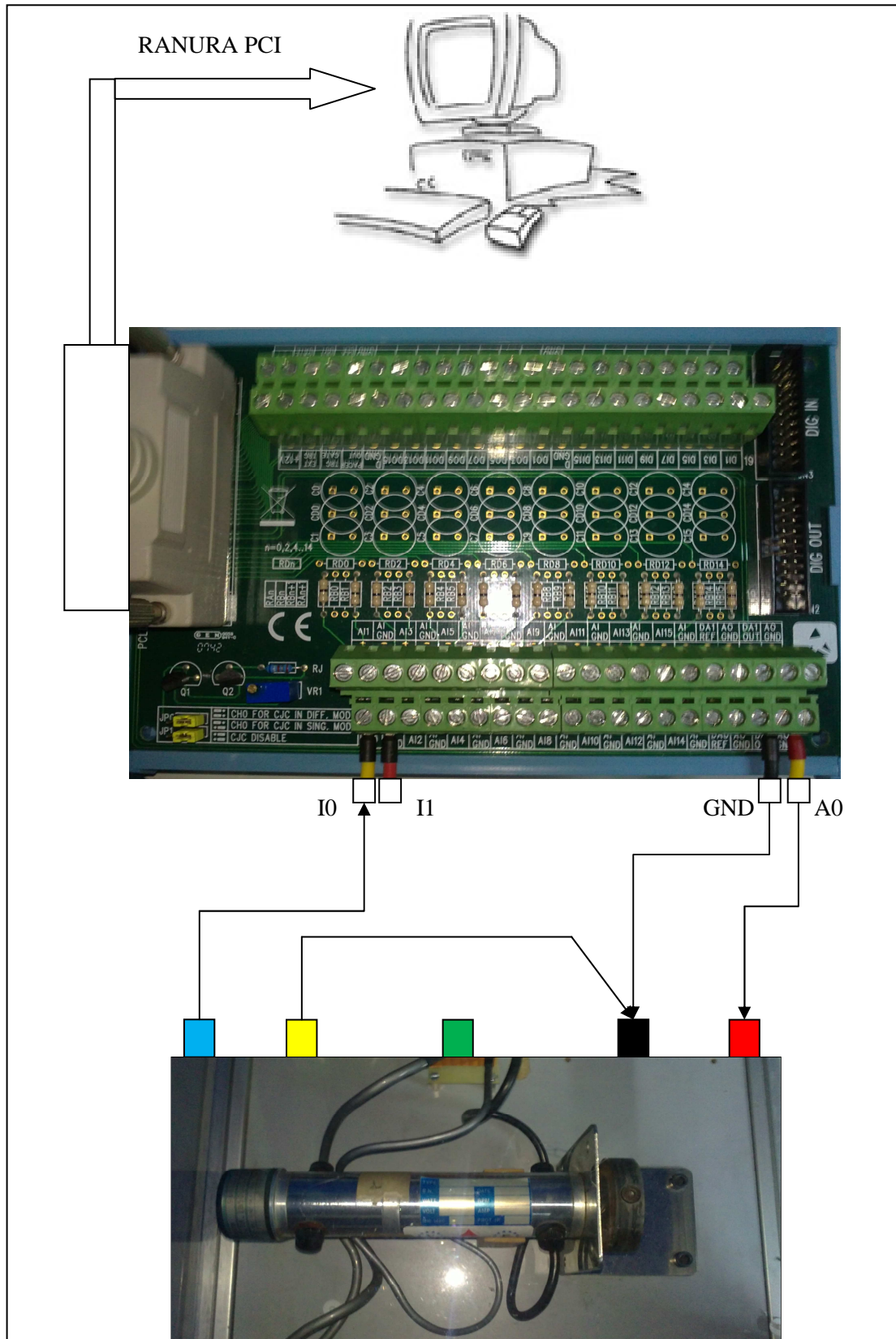


Figura 40. Esquema de conexionado de los elementos que componen la maqueta.

Todo ese cableado electrónico consta de unas salidas y entradas que son necesarias utilizar para poder controlar el motor. En la figura 38 se muestran los bornes de control, las entradas y salidas de los circuitos internos del motor.

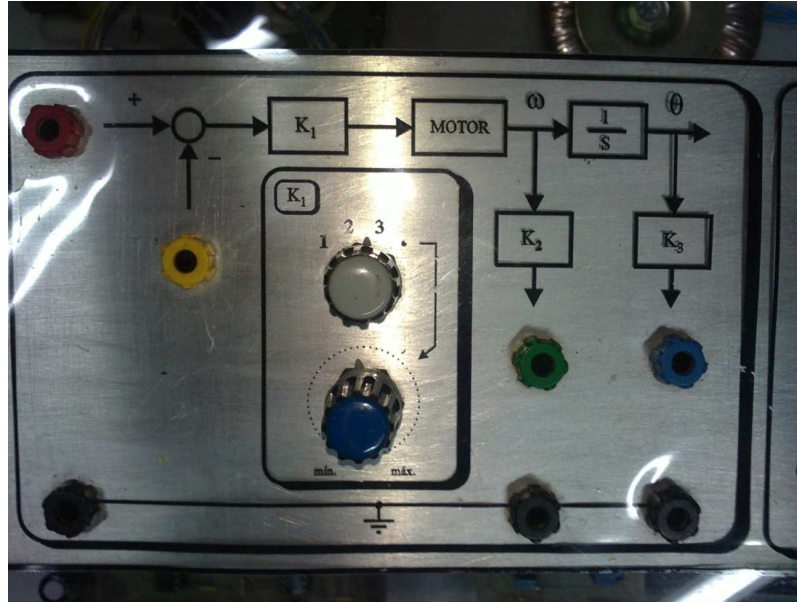


FIGURA 41. BORNES DE CONTROL, ENTRADAS Y SALIDAS DEL MOTOR.

Como se puede observar, cada borne tiene un color. Según se conecten unos u otros el motor puede ser controlado mediante la posición o la velocidad. Vamos a realizar una lista con el significado de cada una de ellos:

- Borne verde. Este borne es la conexión para el control del motor mediante la velocidad de giro del eje. Si se utiliza la maqueta con esta conexión la salida de la misma será mediante velocidad angular ω y podremos variar el control mediante un regulador específico para ello.
- Borne amarillo. Es la entrada de referencia del motor, con la cual se va a comparar la entrada regulada, en este caso, el borne rojo. Se conecta a masa para que no exista ningún tipo de comparación, ya que la referencia en este caso será "0".

- Bornes negros. Son las masas de la maqueta. Todas las masas de los circuitos internos de alimentación y control de la maqueta están conectadas entre sí mediante estas masas. Los tres bornes son el mismo punto.
- Borne rojo. Es la entrada regulada del motor. La señal que entra por este borne es una de las salidas de la tarjeta de adquisición de datos, mediante la cual el motor es controlado por posición.
- Borne azul. Este borne es la conexión para el control del motor mediante la posición que resuelva el encoder. Si utilizamos esta borne estaremos controlando el motor según θ , que es la posición angular de la carga del motor. En este proyecto trataremos de regular esa posición mediante un regulador PID realizado y ajustado expresamente para ello.

Como se puede observar en la figura 25 el motor puede tener 2 modos de funcionamiento, puede ser controlado mediante voltaje de entre $\pm 5V$ o en un rango de 0–10V.

En la Figura 42 observamos que podemos elegir entre cualquiera de los 2 modos. En este proyecto utilizaremos el rango de entre 0 – 10 V, por ajustarse más a nuestras especificaciones.



FIGURA 42. RANGO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.

6.1.1 Tarjeta de adquisición de datos.

Anteriormente descrita en el capítulo 2, se encargará de realizar la recogida y distribución de datos entre el PC y el motor de corriente continua. Trabaja con una alimentación de 24 V.

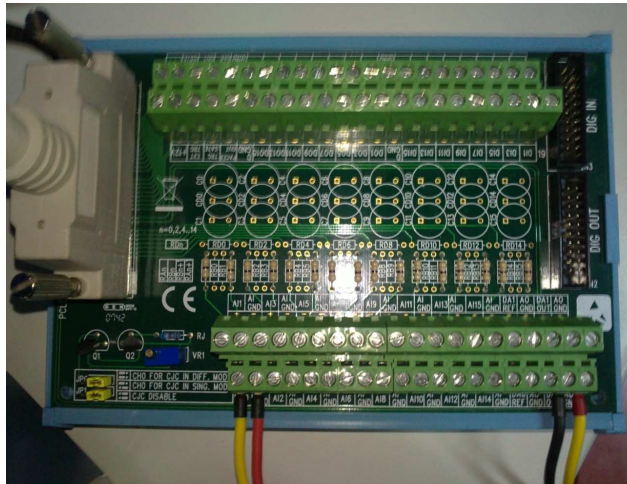


FIGURA. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Como podemos observar en la figura 26, tiene cableadas 4 entrada/salidas. Las de la izquierda son entradas digitales de la tarjeta y las de la derecha son la masa y una salida digital.

Si tenemos en cuenta las conexiones para este control utilizaremos, únicamente, los cables amarillos. El de la izquierda será conectado a la salida del motor (borne azul) y el de la derecha será conectado a la entrada del motor (borne amarillo).

Por último, el cable negro situado en el extremo derecho irá conectado a los bornes negros del motor, es decir, a masa.

6.1.2 PC.

La tarjeta se conecta un ordenador de control mediante una ranura PCI con el que intercambia información constantemente y en tiempo real para la correcta escritura y lectura de los datos proporcionados tanto por el motor como por el propio PC y la realimentación del circuito.

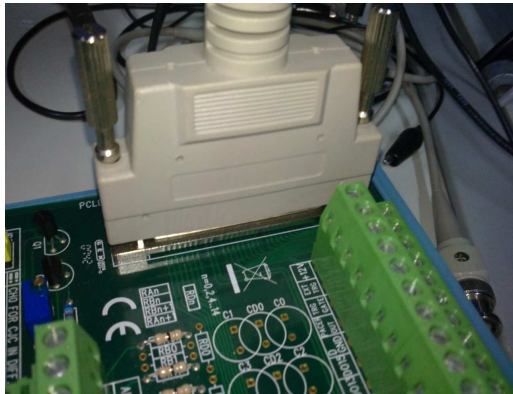


FIGURA 43. CABLE DE CONEXIÓN ENTRE TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y BORNERO DE CONEXIONES.

En el PC se realiza el propio regulador PID con el programa informático Matlab y su herramienta de control mediante bloques Simulink, así como el ajuste del mismo mediante el método de Ziegler-Nichols.

6.2 Esquema de control

Una vez realizado el conexionado de los elementos, el siguiente paso es realizar el esquema de control y regulación mediante Simulink.

Simulink es una herramienta informática perteneciente al programa MatLab mediante la cual se puede estructurar un circuito electrónico en partes o bloques y tratar cada uno de estos de manera independiente.

Tiene la posibilidad de reconocer diferentes tarjetas de adquisición de datos y tratarlas como bloques independientes para poder interactuar con sus entradas y salidas, conexionándolas de acuerdo a las especificaciones necesarias.

Por último, este programa consta de una función de tiempo real, imprescindible para este proyecto, mediante la cual es constante el intercambio de datos entre la maqueta del motor de cc, pasando por la tarjeta de adquisición de datos y el programa que compara constantemente y en periodos de milisegundos las entradas y salidas para proporcionar la estabilidad necesaria al sistema.

El esquema de control realizado en Simulink/MatLab queda configurado según se muestra en la Figura 44.

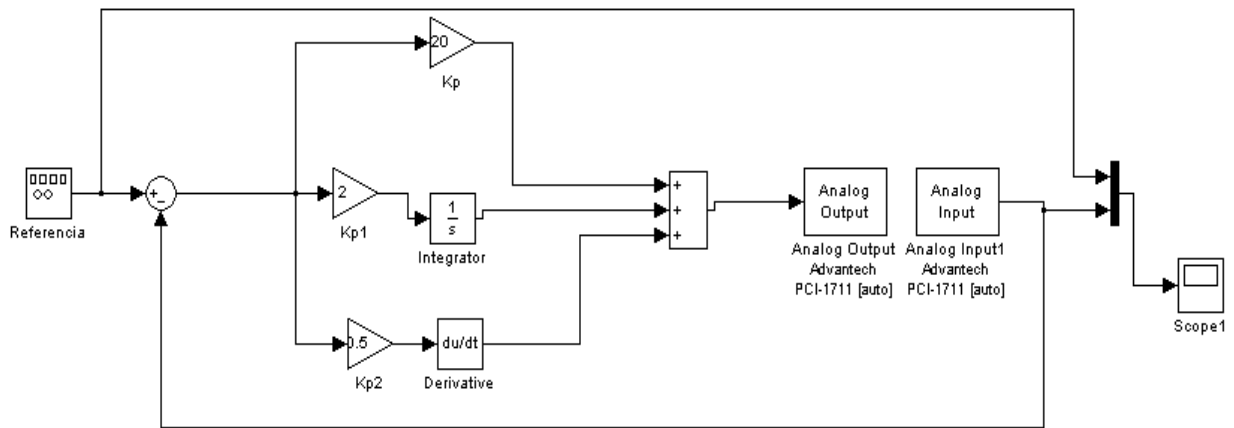


FIGURA 44. ESQUEMA DE CONTROL MEDIANTE UN REGULADOR PID.

Como se puede observar cada bloque por separado constituye una parte del circuito. Se procede a explicar detalladamente cada bloque excluido del esquema general:

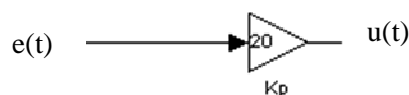
6.2.1 Referencia.

La referencia en la que se basa el circuito es una señal de onda cuadrada de amplitud 4V, variando entre $\pm 2V$.

Es la señal a la que la señal de salida del motor debe seguir y comportarse de la misma forma que ella.

La finalidad de este proyecto es que el motor de corriente continua siga el comportamiento de una señal de onda cuadrada, en la que variando la amplitud podamos variar la posición de la salida del motor.

6.2.2 Acción proporcional.

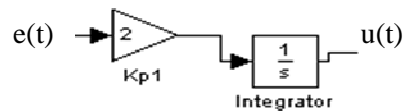


La función de transferencia de este regulador es:

$$R(s) = \frac{u(t)}{e(t)} = K = 20.$$

Este regulador reduce el error generado en el comportamiento de la señal aunque genera oscilaciones.

6.2.3 Acción integral.

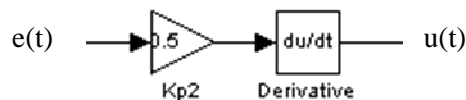


La función de transferencia de la parte integradora será:

$$R(s) = \frac{u(t)}{e(t)} = \frac{K}{s} = \frac{2}{s}$$

Elimina el error en régimen permanente de la señal proporcional pero empeora la respuesta dinámica del sistema, pudiendo hacerlo inestable.

6.2.4 Acción derivativa.

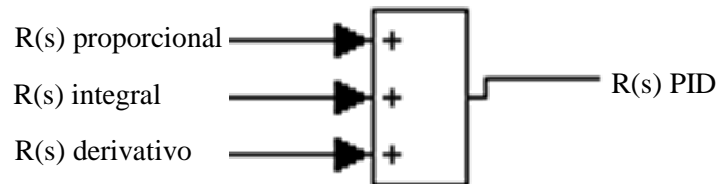


La función de transferencia de la parte derivativa será:

$$R(s) = \frac{u(t)}{e(t)} = K \cdot s = 0,5 \cdot s$$

Mejora la respuesta del sistema en cuanto a sobreoscilación y tiempo de respuesta. Esta acción predice el error futuro, con lo que refuerza la respuesta dinámica del sistema haciéndolo más rápido, incluso llegando a saturar.

6.2.5 ReguladorPID.

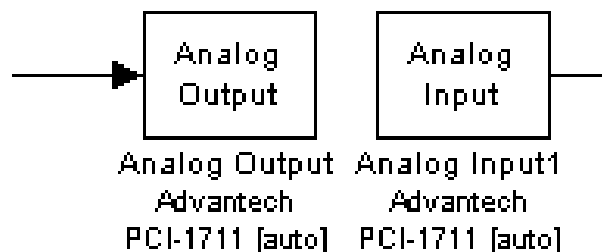


Se calcula sumando los efectos de los 3 reguladores anteriores.

Está formado por los bloques anteriores y un sumador donde se superponen las 3 señales descritas anteriormente.

6.2.6 Entrada y salida de la tarjeta de adquisición.

El sistema se completa con los bloques que trabajan con las entradas y salidas de la tarjeta.



A la salida analógica (Analog Output) de la tarjeta de adquisición le llega la señal de control del PID que posteriormente se conecta con el borne rojo del cuadro de mandos del motor para que le llegue la señal a este.

El motor realiza los comandos que sean necesarios y envía una señal de respuesta desde su borne verde a la tarjeta de adquisición. Una vez allí el sistema de control la recoge por medio de la entrada analógica (Analog Input) y la compara con la referencia para así obtener el error y poder anticiparse a él.

6.2.7 Osciloscopio.

En él se pueden observar las señales superpuestas de referencia y salida del sistema. En la Figura 45 se representa la pantalla del osciloscopio con las 2 señales.

Este es un ajuste manual, realizado por el método de prueba y error, hasta conseguir una señal de salida correcta que sigue a la señal de referencia.

Más adelante, en el siguiente apartado, se obtendrá un ajuste exacto del regulador.

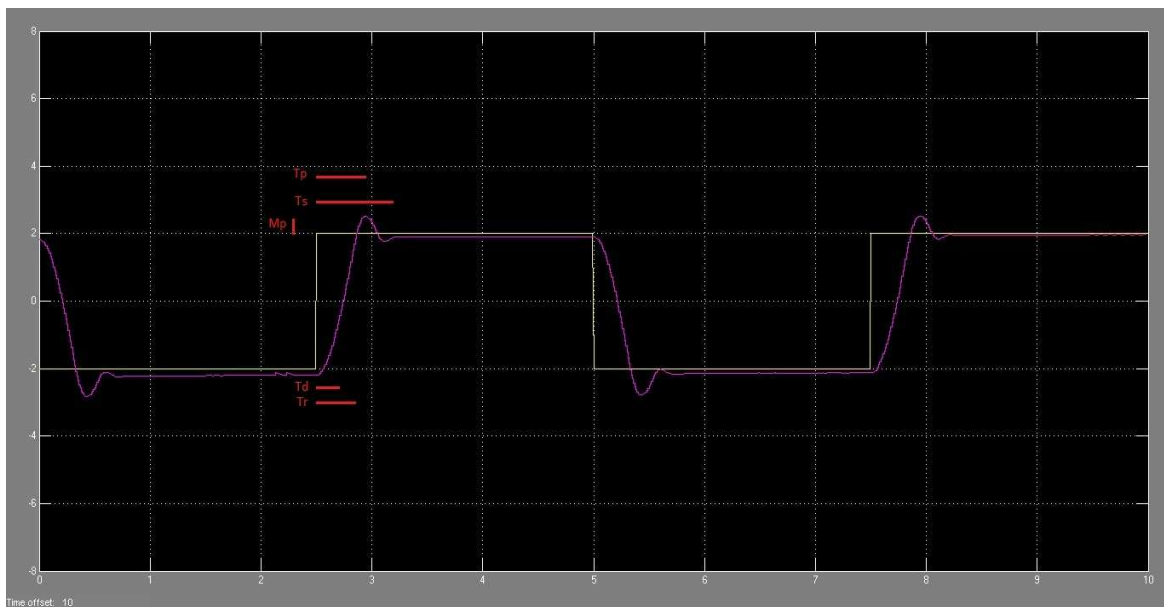


Figura 45. Pantalla del osciloscopio: referencia y salida del sistema regulador.

Los parámetros que se muestran en la figura son los siguientes:

- Tiempo de retardo o “ T_d ”, es el tiempo que tarda la salida del sensor en alcanzar el 50% de su valor final.
- Tiempo de subida: “ T_r ”, es el tiempo que tarda la salida obtenida por el sensor en alcanzar su valor final. Se traduce en la velocidad del sensor, es decir, lo rápido que responde ante una entrada.
- Tiempo de pico: “ T_p ”, es el tiempo que tarda la salida en alcanzar el pico máximo de su sobreoscilación.

- Pico de sobreoscilación: “**M_p**”, expresa cuanto se eleva la evolución temporal de la salida del sensor respecto de su valor final.
- Tiempo de establecimiento: “**T_s**”, el tiempo que tarda la salida del sensor en entrar en la banda del 5% alrededor del valor final y ya no vuelve a salir de ella.

Como se puede observar la señal amarilla es la referencia de entrada al regulador. Se trata de una señal cuadrada variando entre $\pm 2V$. Su periodo es de 2,5 segundos.

La señal de color morada es la respuesta del sistema ante entrada cuadrada. Se trata de una señal con las siguientes características:

- $T_d = 0.2 \text{ s}$
- $T_r = 0.4 \text{ s}$
- $T_p = 0.5 \text{ s}$
- $M_p = 0.9 \text{ V}$
- $T_s = 0.6 \text{ s}$

De la figura se obtiene que la señal de respuesta sigue a la señal amarilla, con lo que obtenemos un control PID mediante una onda cuadrada como señal de referencia.

6.3 Ajuste del regulador

Para un ajuste correcto es necesario realizar los pasos explicados en los apartados 5.1 y 5.2 del ajuste por Ziegler-Nichols.

La primera prueba experimental que realizamos es el ajuste en cadena abierta del regulador PID y obtenemos como respuesta que es imposible ajustar por este método ya que al ser un control por posición la señal de salida actúa como un integrador.

En el caso de que hubiéramos controlado el motor por velocidad si podríamos realizar este método experimental.

En la Figura 46 se observa la salida mediante el ajuste por este método.

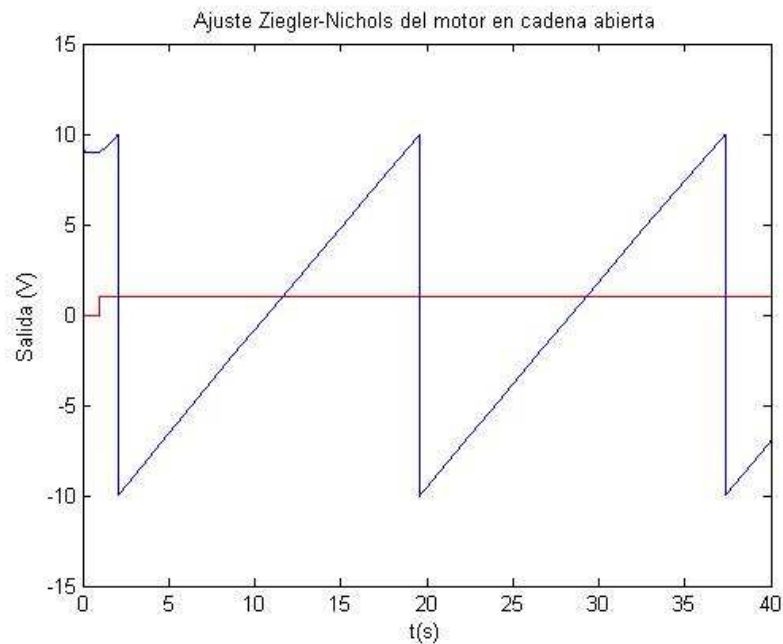


FIGURA 46. GRÁFICA DEL AJUSTE POR EL MÉTODO DE CADENA ABIERTA.

Al realizar el ajuste por el método de Ziegler-Nichols en cadena cerrada se realizaron varias pruebas experimentales hasta dar con la ganancia correcta. Dado que si existía una oscilación constante si se puede ajustar este sistema mediante el método de cadena cerrada. La K que se varía durante este método es la K del regulador proporcional tal y como se describe en el apartado 5.2

6.3.1 Ganancia $K=50$.

La primera prueba que se realizó es con una ganancia en cadena cerrada de $K = 50$ como se muestra en la Figura 47.

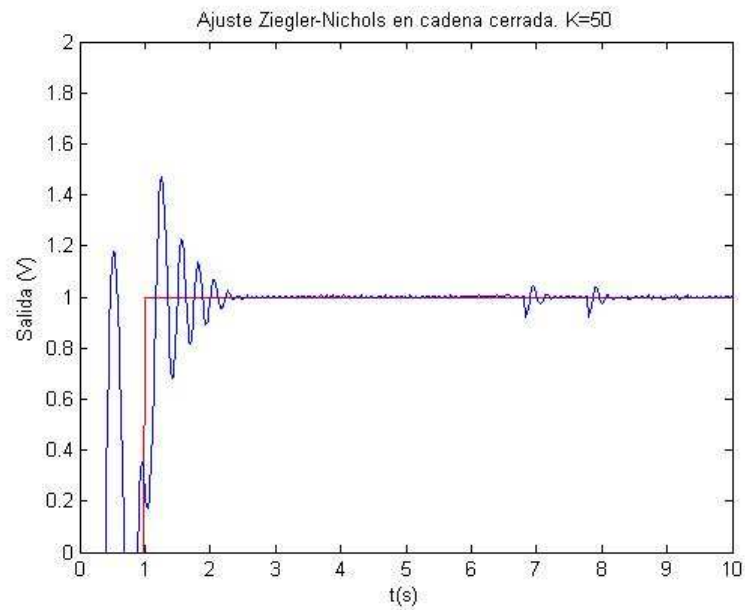


FIGURA 47. CADENA CERRADA CON $K = 50$

Como se puede observar la ganancia es muy pequeña y el sistema no oscila, por tanto, fue necesario aumentar la ganancia.

6.3.2 Ganancia $K=100$.

Aumentamos a $K = 100$ y obtenemos esto:

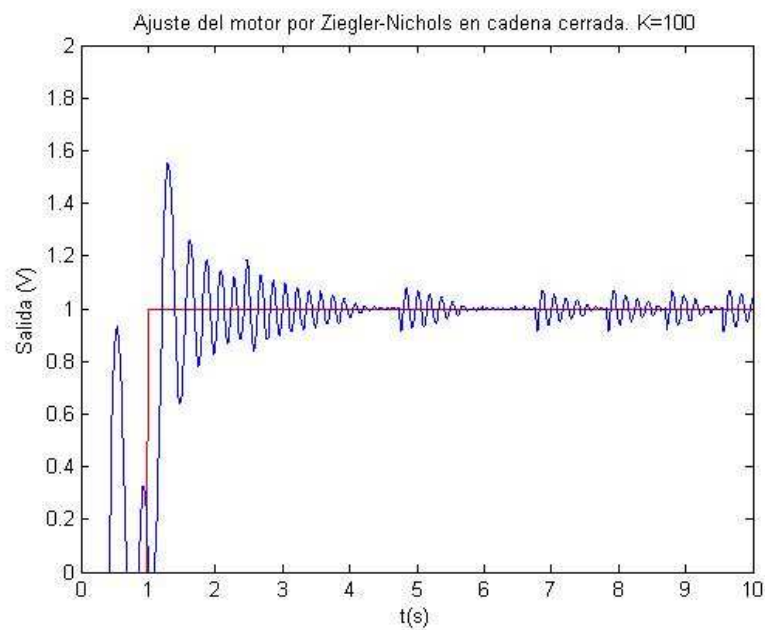


FIGURA 48. CADENA CERRADA CON $K = 100$

No conseguimos que oscile con lo cual aumentamos la ganancia a $K = 200$.

6.3.3 Ganancia $K=200$.

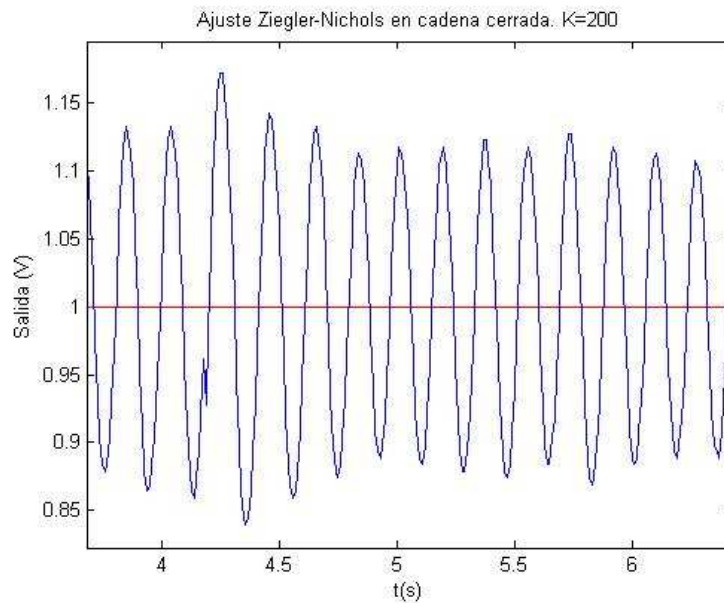


FIGURA 49. CADENA CERRADA Y $K = 200$.

Con esta medida el sistema oscila pero es necesario comprobar que con una ganancia de entre 100 y 200 el sistema oscila o no.

6.3.4 Ganancia K óptima.

Después de realizar diversas pruebas obtenemos que la ganancia mínima a la cual el sistema oscila es $K = 125$:

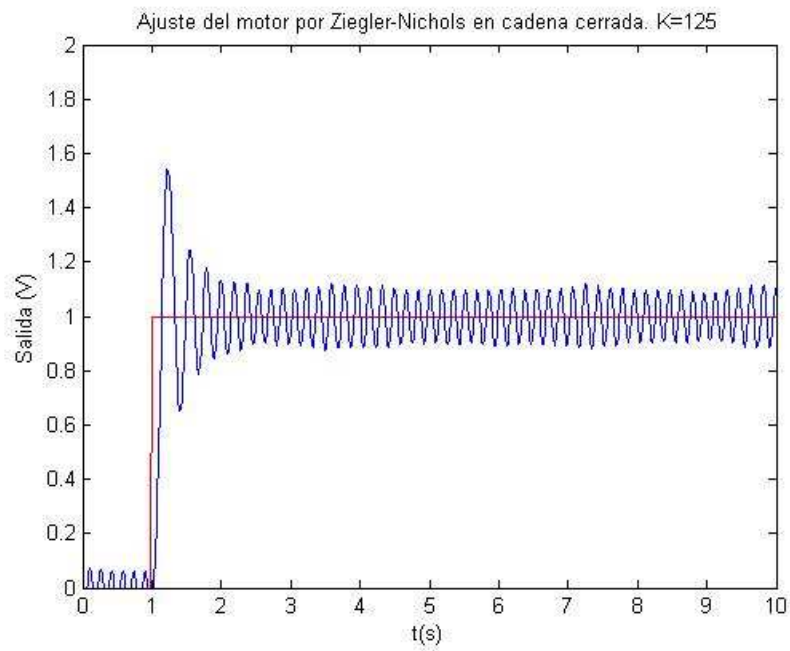


FIGURA 50. CADENA CERRADA Y $K = 125$.

Para obtener los parámetros de ajuste del regulador es necesario realizar un zoom donde se aprecie correctamente el período de la señal.

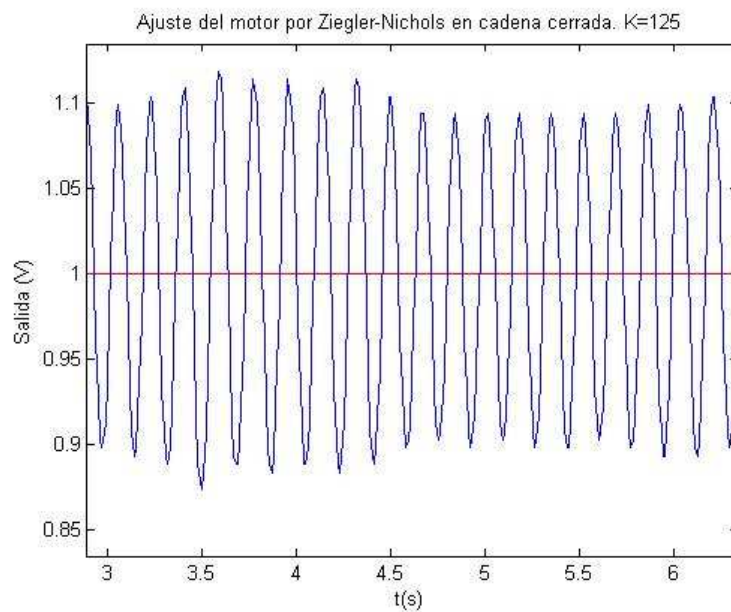


FIGURA 51. ZOOM DE $K = 125$. K ÓPTIMA.

Por tanto, de esta gráfica se desprende que $K_c = 125$. Ahora es necesario calcular T_c .

Para ello se analiza el zoom y obtenemos un periodo de 0.355 s.

Ahora, utilizando la tabla 2 y sus fórmulas, vamos a obtener los valores óptimos de regulación para este sistema.

- $K_p = 0.6 \cdot K_c = 0.6 \cdot 125 = 75$
- $K_i = 1.2 \cdot \frac{K_c}{t_c} = \frac{2K_p}{T_c} = \frac{2 \cdot 75}{0.355} = 422$
- $K_d = 0.075 K_c t_c = 0.5 \frac{K_p t_c}{8} = 1,664$

Introducimos los valores en el diagrama de Simulink para obtener la gráfica y el resultado se encuentra en la Figura 52.

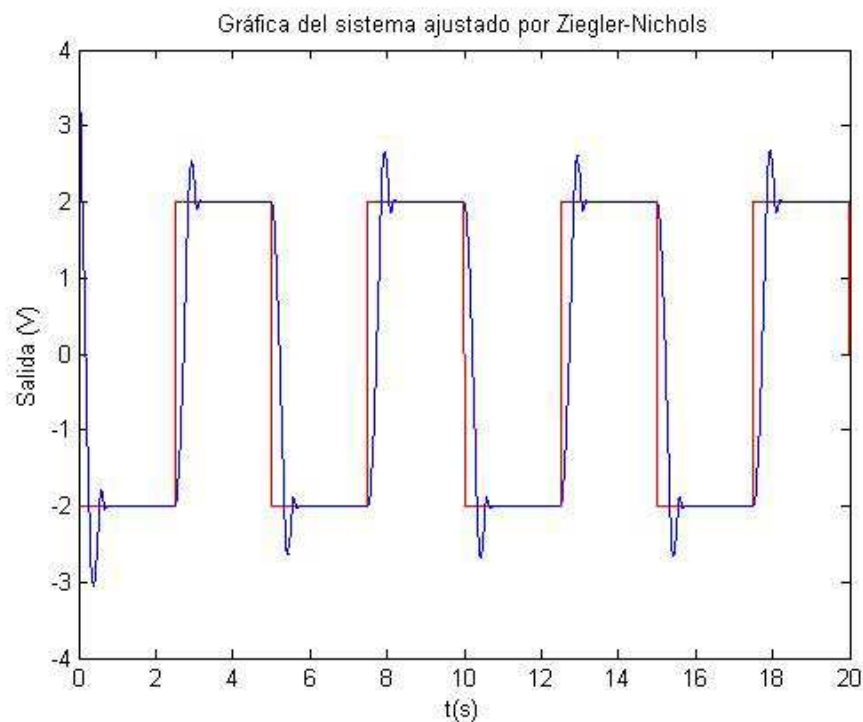


Figura 52. Gráfica del sistema ajustado por ziegler-nichols.

Se observa que el control final conseguido hace que sea bastante rápido, aunque con el pequeño pico que contempla las especificaciones del método utilizado.

7. CONTROL DE TEMPERATURA DE UN SECADOR.

7.1 Introducción a los sistemas de temperatura.

El objetivo de este trabajo es controlar la temperatura de un sistema (en este caso la salida de un secador de pelo), usando un control por Regulador PID.

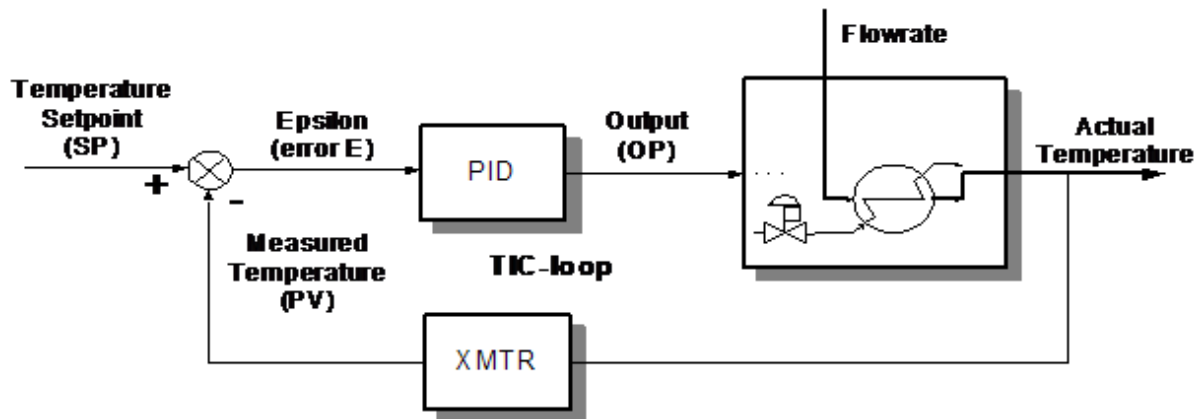
Al igual que podríamos mantener la temperatura adecuada en un horno para un tratamiento de un mineral en una refinería, o cómo podríamos hacer un control de un sistema de calefacción. Es aquí donde entran a tallar los controles que rigen el comportamiento de la temperatura.

Un sistema de control de temperatura, obtiene la temperatura del sistema a medir mediante un sensor (explicado en el capítulo 1, sección 1.4), y esta señal es tratada, ya sea digital o analógica (según el tipo de control a tratar). Y luego pasa a un sistema de control el cual activa, desactiva, aumenta o disminuye el sistema que estará encargado de mantener la temperatura.

Por ejemplo, para el caso de un horno, si la temperatura es mayor, disminuirá la potencia del horno, y si es demasiado bajo, aumentará esta.

En la Figura 53 se puede observar un sistema de medición y control de temperatura muy parecido al detallado en esta práctica. Este sistema representado es muy utilizado en la industria actual en el intercambio y transferencia de calor entre fluidos, teniendo un sensor en la salida del sistema que dimensiona la temperatura a la cual se encuentra el fluido. Ésta información es enviada mediante comunicación al sistema de control distribuido donde se realiza la regulación PID.

Un ejemplo donde se podría utilizar el sistema docente controlado en esta práctica al igual que se utiliza el representado en la Figura 53 es en la industria termosolar donde se controla la temperatura de los intercambiadores entre el vapor de agua con el aceite térmico utilizado.



Feedback Control of Exchanger Outlet Temperature

FIGURA 53. INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS UTILIZADO EN PLANTAS TERMOSOLARES.

7.2 Descripción de la maqueta.

En este proyecto no vamos a ver un sistema de control de la potencia, si no un sistema de control todo o nada dado por una histéresis debido a una entrada de referencia y la señal que viene del sensor.

En la figura tal podemos observar la maqueta del secador. Se compone de 4 partes las cuales describimos a continuación.

- Secador: Situado en la foto arriba a la izquierda. Se trata de un secador de pelo cotidiano en el que se ha introducido un sensor de temperatura a la salida del mismo para controlar los grados centígrados a los que sale el aire.
- Sistema de acondicionamiento de la señal. El sensor del secador obtiene unos datos de temperatura que pasan mediante una señal eléctrica al circuito de acondicionamiento. Aquí se amplifican, se filtran y por último se convierten en una señal de 4 – 20 mA que se transmite a través del cable gris que se aprecia en la foto arriba a la derecha.
- Fuente de alimentación. Situado en la foto abajo a la izquierda. Tanto el secador de pelo como el circuito de acondicionamiento de la señal necesitan tensión para trabajar.

En este sistema también se encuentra el transformador de alterna-continua utilizado para la alimentación del secador. Transforma los 220 V de alterna de la red en 15 V de continua que posteriormente se conectan al aparato.

- Entradas/salidas analógicas e interruptor. Situado abajo a la derecha, se trata de los bornes donde se pueden instalar dispositivos como un osciloscopio para ver las señales del secador.



Figura 54. maqueta del secador.

Una vez realizado el análisis de la maqueta es necesaria la adecuación de la señal de control entre la tarjeta de adquisición y el propio aparato.

Debido a que el circuito del secador necesita una señal de control en corriente de 4-20 mA, y la tarjeta de adquisición de datos emite una señal de control en Voltios, es necesario un circuito intermedio que convierta una tensión en intensidad. Para ello utilizaremos un convertidor tensión-intensidad como el descrito en el capítulo 4 en el apartado 4.5.4.1.

En la Figura 55 y la Figura 56 se muestra el convertidor real utilizado en el proceso. Se trata del modelo Siemens 3RS-1705 -1FW00. Su característica principal es que tiene múltiples funcionalidades de conversión. Permite alternar entre 3 tipos de señales: 0-10V, 0-20 mA y 4-20 mA. Nosotros en este proyecto necesitaremos una conversión 0-10V a 4-20 mA.

Este convertidor como todos los circuitos electrónicos necesita una alimentación, que se la proporcionaremos mediante una fuente de corriente continua del laboratorio. La alimentación necesaria es de 24 Vdc.

Las características técnicas de este convertidor se pueden encontrar adjuntas en los anexos, al final del proyecto.

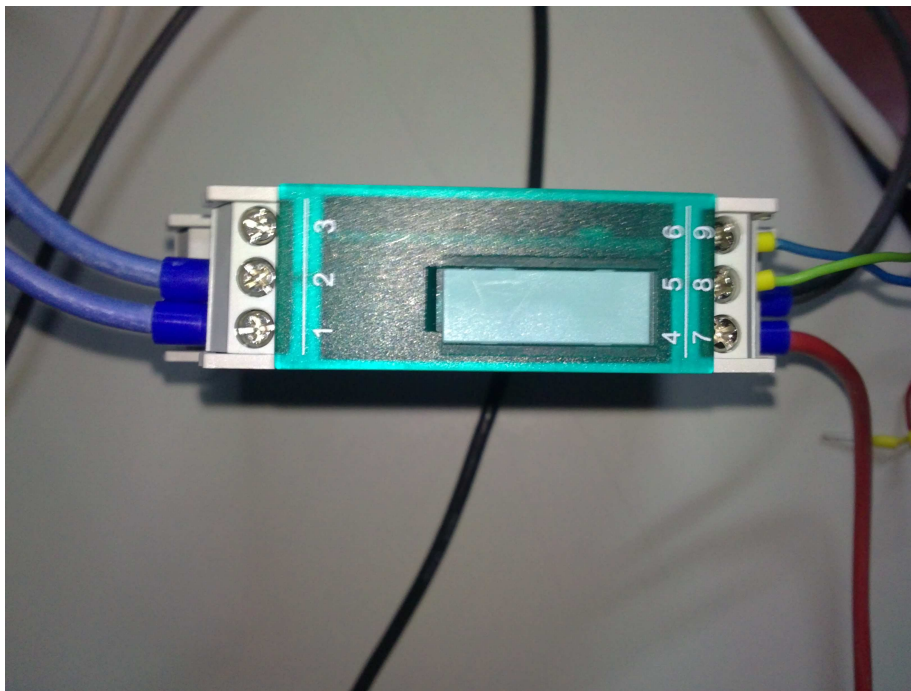


Figura 55. VISTA FRONTAL DEL CONVERTIDOR TENSIÓN INTENSIDAD.



FIGURA 56. VISTA LATERAL DEL CONVERTIDOR TENSION INTENSIDAD.

Una vez descritos los distintos componentes del sistema, en la Figura 57 se muestra el conexionado de los distintos elementos que componen la maqueta.

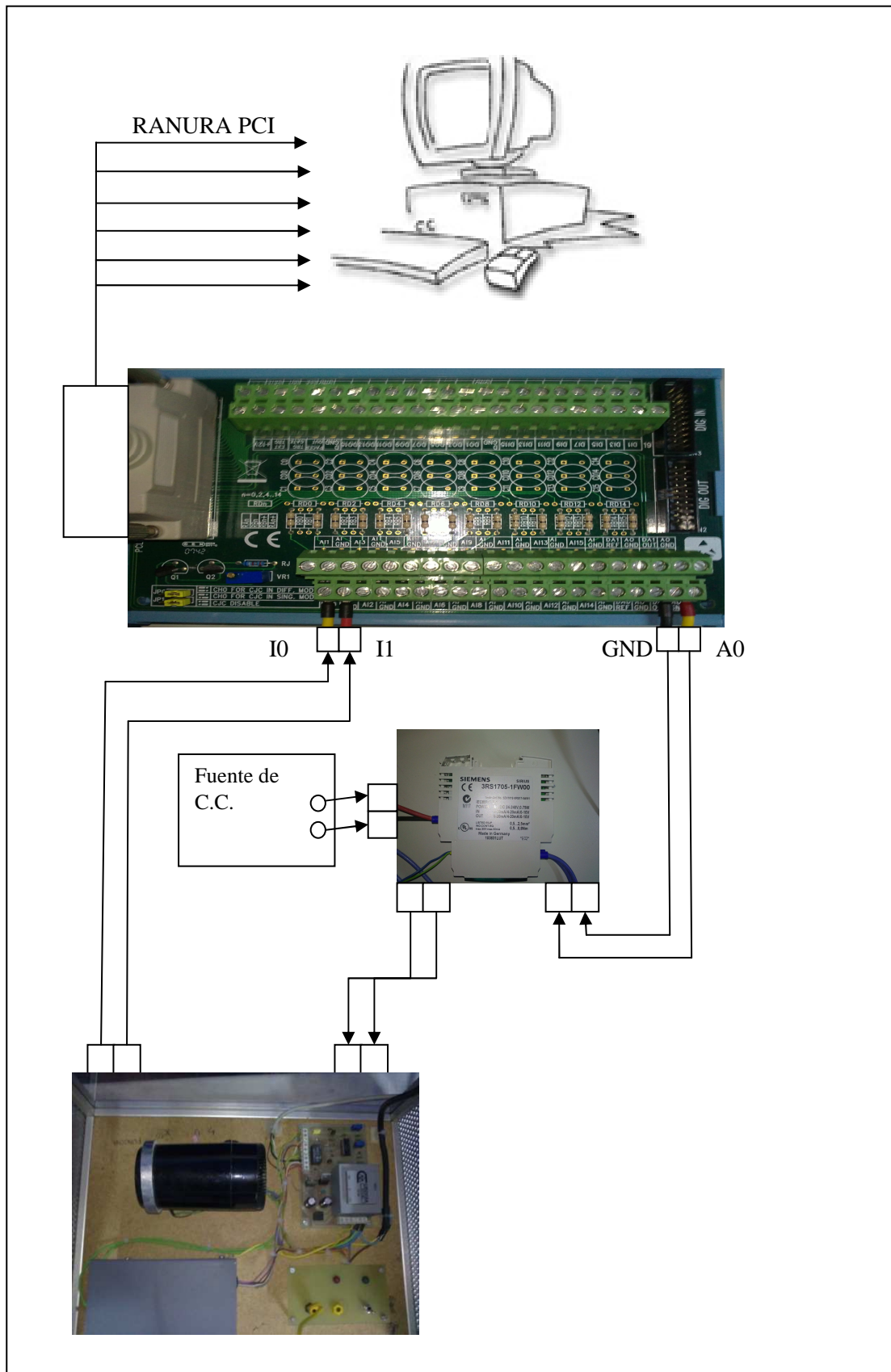


FIGURA 57. ESQUEMA DE CONEXIONADO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN LA MAQUETA.

7.3 Esquema de control

Al igual que en el proceso del motor de corriente continua el siguiente paso a realizar es un esquema de control en simulink para el control del secador. Podemos tomar el mismo modelo que para el motor pero variando los parámetros de control para obtener la señal adecuada.

Teniendo en cuenta que se trata de un sistema real de respuesta lenta la precisión de medida es inferior a la encontrada en el sistema del motor. Se denomina sistema de respuesta lenta porque la variación de temperatura que realiza el secador es incremental respecto al tiempo y no instantánea como ocurría en el caso del motor. Al tratarse de un sistema analógico es imposible que el secador cambie de 20°C a 60°C instantáneamente, si no que necesitará un tiempo de respuesta y estabilización mayor pasando por varios rangos de temperatura, antes de llegar al valor final. Esto se observa gráficamente en la Figura 61.

Este sistema se basa en la medida de un sensor de temperatura RTD descrito en el capítulo 1. Este sensor al encontrarse justo en la salida del secador, donde la corriente formada por el ventilador interno del propio secador es muy fuerte, tiene un gran componente de ruido que no le permite realizar una lectura de la temperatura óptima para este tipo de medidas. Para el caso que nos ocupa, utilizaremos unos datos aproximados a la media de la señal para poder obtener la mejor medida posible en los ensayos de control.

Este problema podría solucionarse con un filtro de reducción de ruido, ya sea electrónico o por software.

En la Figura 58 se muestra el esquema de control mediante software de la maqueta del secador.

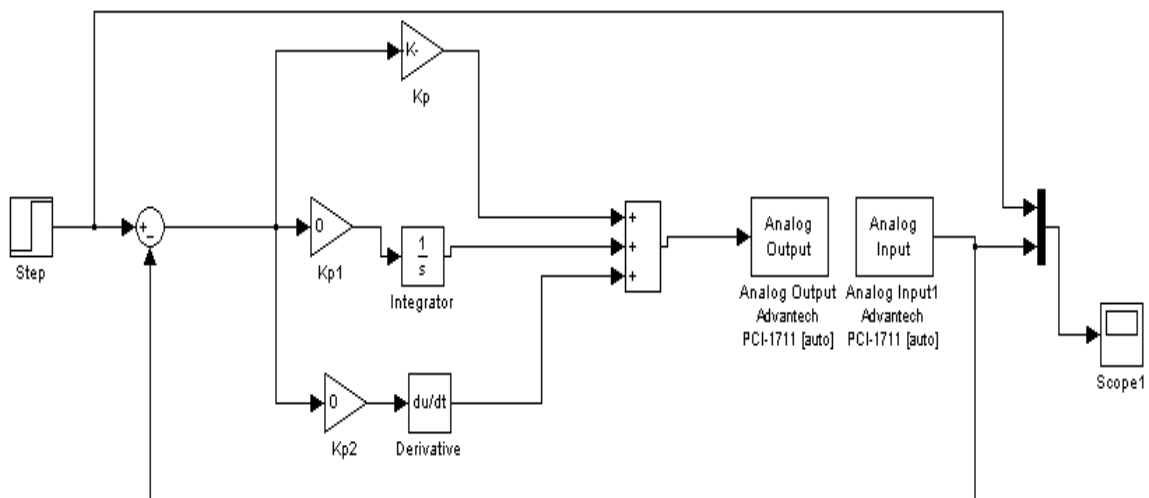


FIGURA 58. ESQUEMA DE CONTROL DEL REGULADOR PID PARA EL CONTROL DE UN SECADOR.

Una vez realizado el esquema se procedió a realizar diversas pruebas de regulación para conseguir el ajuste correcto al sistema propuesto. A continuación se representan las más relevantes o donde se puede apreciar el efecto de los distintos bloques del regulador.

7.3.1 $K_p=10$, $K_i=1$, $K_d=1$.

En la Figura 60 se muestra la señal de salida del secador para este ajuste primer ajuste.

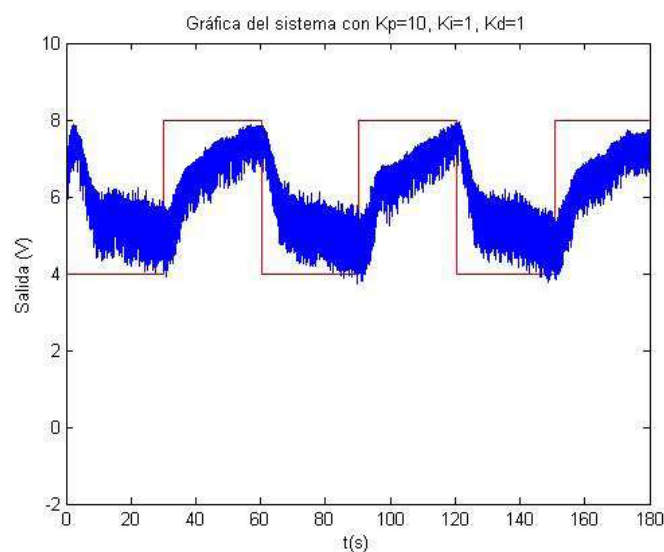


FIGURA 59. GRÁFICA DEL REGULADOR $K_p=10$, $K_i=1$, $K_d=1$.

Se observa que la respuesta que se obtiene es con mucho ruido, hecho que dificulta que el control de la misma sea bueno.

7.3.2 $K_p=100$, $K_i=10$, $K_d=10$.

En la Figura 61 se muestra la señal de salida del secador para este ajuste. Al aumentar la ganancia derivativa, el sistema responde más rápido en los primeros instantes.

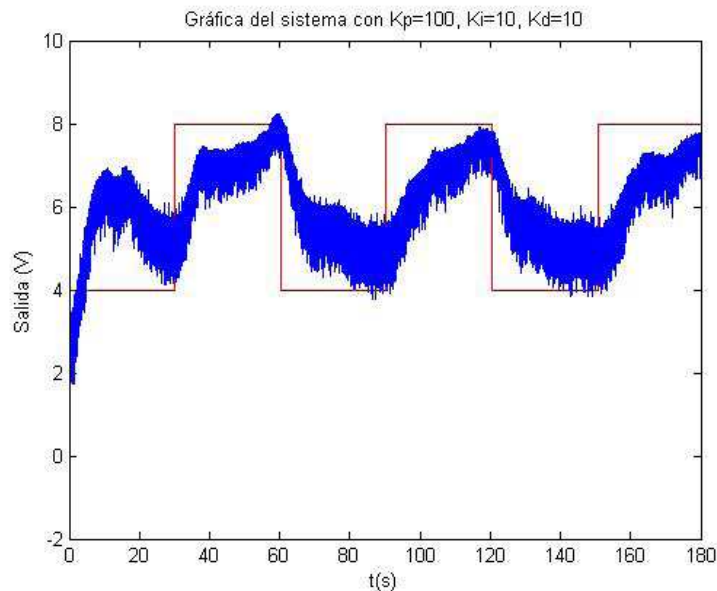


FIGURA 60. GRÁFICA DEL REGULADOR $K_p=100$, $K_i=10$, $K_d=10$

Por último representamos la gráfica más ajustada que se consiguió después de realizar varias pruebas más.

7.3.3 Regulación óptima. $K_p = 100$, $K_i=1$, $K_d = 1$.

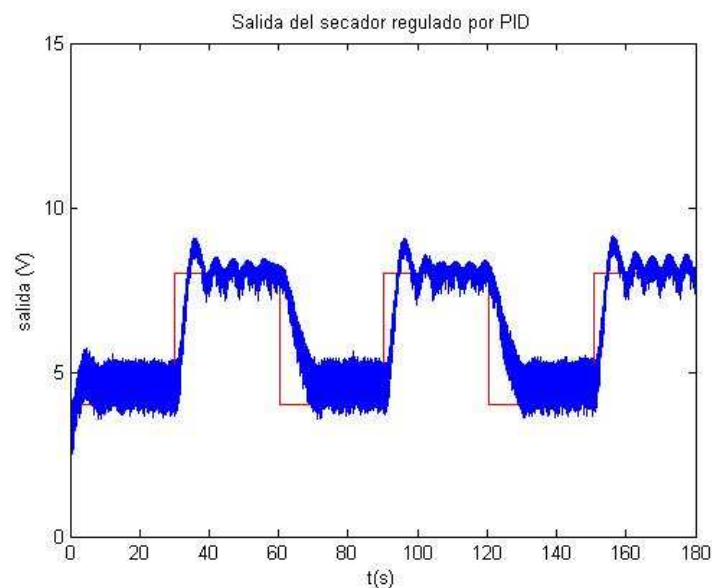


FIGURA 61. CONTROL DE TEMPERATURA DE UN SECADOR MEDIANTE UN REGULADOR PID.

Como se puede observar en la línea azul, el ruido antes comentado aparece en la señal y distorsiona su medida, ya que no se trata de una línea perfecta que sigue a la referencia, si no que sufre variaciones por efecto del ventilador interno. Si nos fijamos, aunque la señal de control no está ajustada por ningún método, tiene un tiempo de estabilización de aproximadamente 5 o 6 segundos, muy superior al del circuito de control del motor.

7.4 Ajuste del regulador

A continuación, dado que la dinámica del sistema es muy lenta, se procedió a la configuración en cadena abierta de Ziegler-Nichols según se indica en el Capítulo 5.

Aplicamos un circuito de control en cadena abierta ante entrada escalón con lo que obtenemos la gráfica representada en la Figura 63.

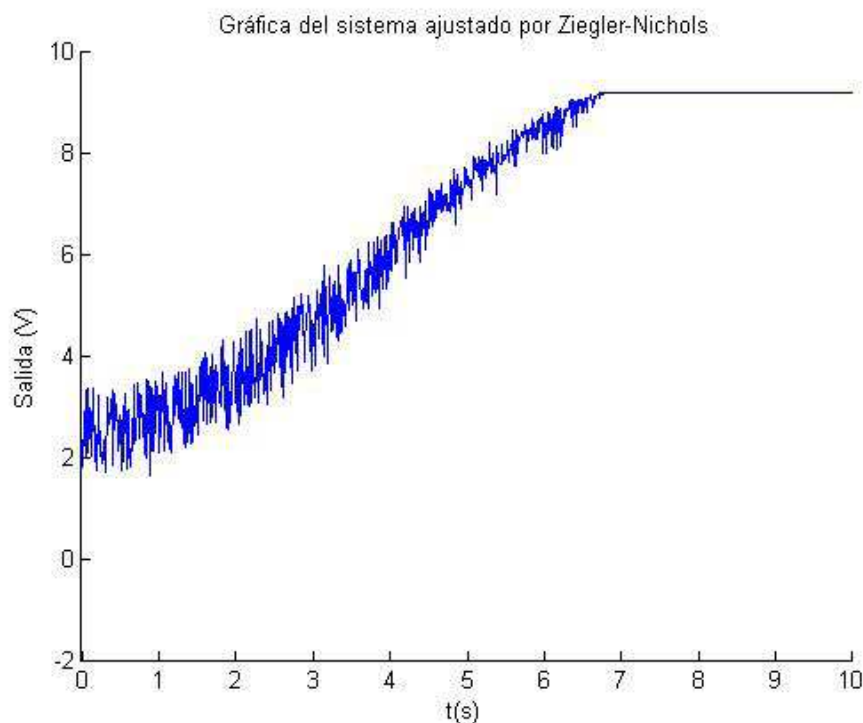


FIGURA 63. CIRCUITO ABIERTO DEL SECADOR ANTE ENTRADA ESCALÓN.

De esta figura, analizando sus propiedades y siguiendo las instrucciones del capítulo 5 se obtiene los siguientes parámetros:

- $K = 7,07$
- $T_0 = 1,17$
- $T = 5,54$

Aplicando las fórmulas de la Tabla 1 se obtienen los siguientes parámetros obtenien los siguientes parámetros:

- $K_p = 0,803$
- $K_i = 0,3434$
- $K_d = 0,4697$

En la Figura 64 se muestra la señal de salida tras aplicar este método.

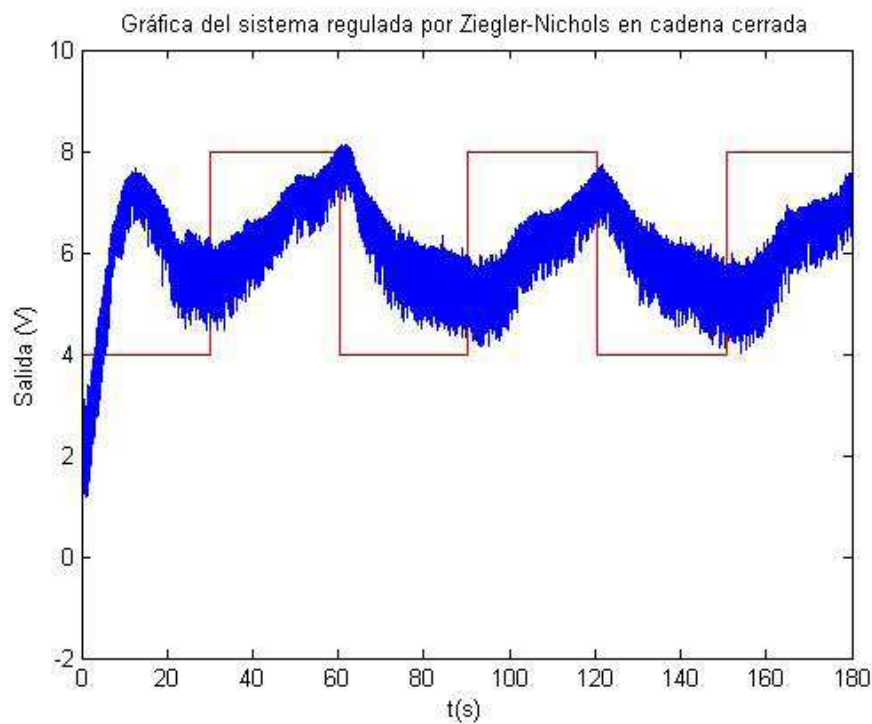


FIGURA 64. AJUSTE DEL REGULADOR DEL SECADOR POR EL MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS EN CADENA ABIERTA.

Como se puede observar en la línea azul, el ruido antes comentado aparece en la señal y distorsiona su medida, ya que no se trata de una línea perfecta que sigue a la referencia, si

no que sufre variaciones por efecto del ventilador interno. En este caso, el control obtenido realizando pruebas mediante ensayo se considera mucho mejor.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusiones

Después de realizar un examen exhaustivo y de realizar muchas pruebas tanto con el motor de corriente continua, el secador y la tarjeta de adquisición existen diferentes conclusiones que se desprenden de este proyecto.

Teniendo en cuenta el objetivo en el objetivo final para el que se van a aplicar las maquetas, se ha conseguido adaptar la maqueta del secador para su uso con Matlab y Simulink, permitiendo realizar pruebas de control con el ordenador sobre ellas. Con lo cual, se abre una posibilidad más para realizar prácticas de control y su integración en futuros laboratorios remotos.

Como conclusiones de control se ha visto que cualquier proceso industrial necesita un tiempo de estabilización hasta que alcanza su régimen óptimo de funcionamiento. Los sistemas de control que se utilicen para el control de sistemas deberán tener en cuenta este tiempo y estar dimensionados y preparados para ello.

Si tenemos en cuenta las gráficas de control de los dos sistemas propuestos se puede observar que el sistema del motor tiene una respuesta mucho más fácil de controlar que el secador en el que aparece el ruido, factor importante a tener en cuenta en todos los procesos de control. Es necesario, por tanto, integrar un elemento que minimice el ruido y sea capaz de volcar una medida correcta en nuestro sistema..

8.2 Trabajos futuros

La elaboración de este proyecto deja un camino abierto para que en un futuro los alumnos puedan probar sus configuraciones de diseño y control mediante software desde casa sin tener que ir al campus directamente para probarlas. Para ello un trabajo futuro podría ser un software mediante Matlab que introdujese el factor distancia y en el que las señales de control vinieran externamente desde internet o que pudiera ser controlado desde un ordenador remoto. Para ello sería necesaria también una cámara web para observar el funcionamiento del motor. En el caso del secador no sería necesaria esa cámara ya que lo necesario en este caso es la medición del sensor.

Otro posible trabajo futuro que se desprende de este proyecto es la realización de un filtro para la maqueta del secador, ya sea electrónico o por software, para la disminución del ruido del sistema que puedan provocar elementos externos al mismo. Existen diversas formas de atenuación de ruido. Una opción posible es la medición de ruido para tenerlo controlado y de esta forma adecuar la señal para neutralizarlo.

En el motor de corriente continua se podrían incluir ciertas cargas mínimas para que se observara las desviaciones que sufren los sistemas reales por otros motivos externos, es decir, vibraciones, ruido, potencia, etc.

En la maqueta del secador se podría modificar el circuito e incluir un pequeño estanque con fluido que al ser calentado el sensor midiera la temperatura del mismo y pudiera dar, incluso alguna señal de alarma por alta temperatura cuando el fluido se calentara demasiado.

BIBLIOGRAFÍA

- www.wikipedia.es Visualizada en octubre de 2011
- Pallás Areny, Ramón: "Adquisición y Distribución de Señales". Editorial Marcombo.
- Loveday, G. C.: "Diseño de Hardware Electrónico". Editorial Paraninfo.
- Lessons in industrial instrumentation by Tony R. Kuphaldt
- www.fagorautomation.com Visualizada en octubre de 2011
- Teoría de sistemas. Fernando Matía, Agustín Jiménez, Rafael Aracil. Sección de publicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid.